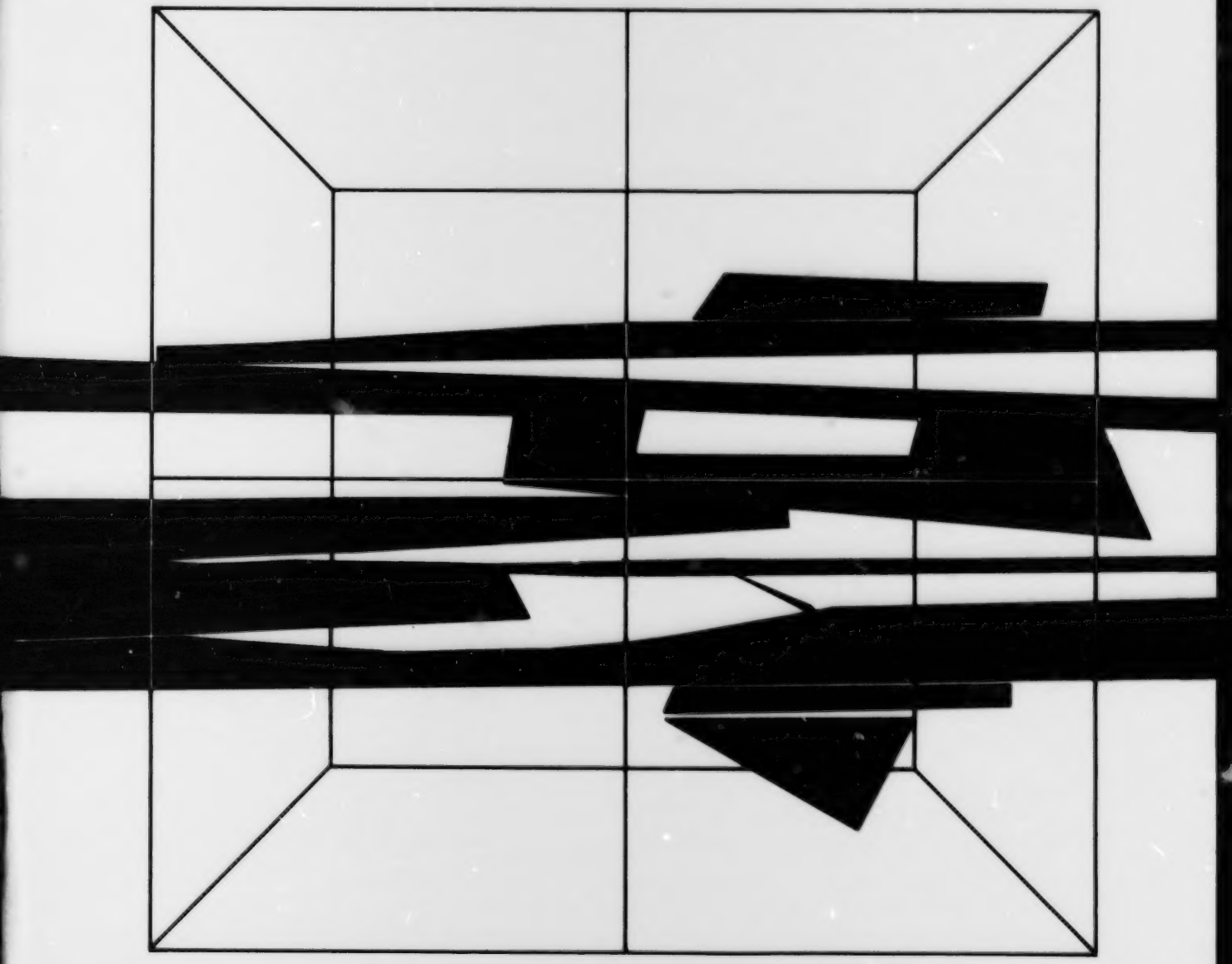
Détection, prévention et correction des fuites dans les réservoirs de stockage souterrains

Rapport SPE 2/PN/1
Février 1989



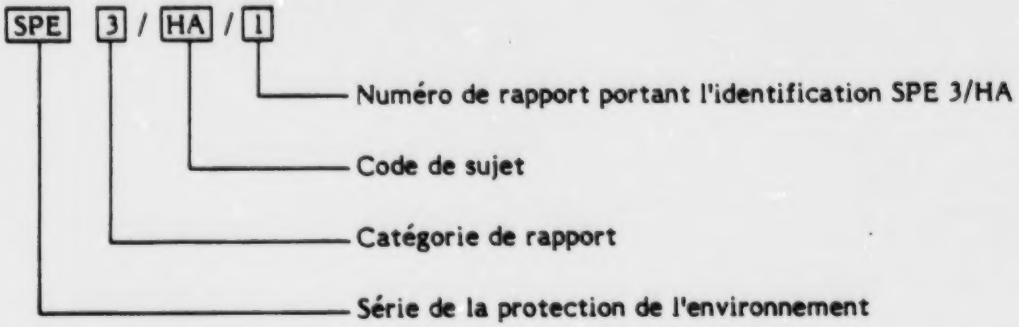
Environnement Canada Environment Canada

Canada

89-02224/

SÉRIE DES RAPPORTS DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Exemple de numérotage:



Catégories

1	Règlements/Lignes directrices/ Codes de procédure
2	Consultation publique: évaluation des problèmes, options de contrôle
3	Recherche et développement technologique
4	Revues de la documentation
5	Relevés
6	Évaluations des impacts sur l'environnement
7	Surveillance
8	Propositions, analyses et énoncés de principes généraux
9	Guides

Sujets

AG	Agriculture
AN	Technologie anaérobie
AP	Polluants atmosphériques
AT	Toxicité aquatique
CC	Produits chimiques commerciaux
CE	Consommateurs et l'environnement
CI	Industries chimiques
FA	Activités fédérales
FP	Traitement des aliments
HA	Déchets dangereux
IC	Chimie inorganique
MA	Pollution marine
MM	Exploitation minière et traitement des minéraux
NR	Régions du Nord et rurales
PF	Papier et fibres
PG	Production de l'électricité
PN	Pétrole et gaz naturel
SF	Traitement de surface
SP	Déversements de pétrole et de produits chimiques
SRM	Méthode de référence normalisée
TS	Systèmes de transport
UP	Pollution urbaine
WP	Protection/préservation du bois

Sujets et codes additionels sont introduits au besoin. Une liste de rapports du SPE peut être obtenue en s'adressant aux Publications de la protection de l'environnement, Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0H3.

DÉTECTION, PRÉVENTION ET CORRECTION DES FUITES DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE SOUTERRAINS

par la

Direction du développement technologique et des services techniques
Conservation et Protection
Environnement Canada

Rapport SPE 2/PN/1
Février 1989

Données de catalogage avant publication (Canada)

Vedette principale au titre:

Détection, prévention et correction des fuites dans les réservoirs de stockage souterrains

(Rapport; SPE 2/PN/1)
Comprend un résumé en anglais.
Publ. aussi en anglais sous le titre: Detection, prevention and remediation of leaks from underground storage tanks.
Bibligr.: p.
ISBN 0-662-95303-7
Cat. MAS no En49-11/2-1F

1. Pétrole -- Stockage souterrain -- Sécurité -- Mesures. 2. Produits pétroliers -- Stockage souterrain -- Sécurité -- Mesures. 3. Réservoirs de stockage de produits pétroliers -- Entretien et réparations. 4. Stockage souterrain -- Sécurité -- Mesures. I. Canada. Conservation et la protection. II. Canada. Direction du développement technologique et des services techniques. III. Canada. Environnement Canada. IV. Collection: Rapport (Canada. Environnement Canada ; SPE 2/PN/1).

TP692.5.D4714 1989 665.5'42 C89-097032-7

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1989
N° de cat. En49-11/2-1F
ISBN 0-662-95303-7
IMPRIMEURS BEAUREGARD

RÉSUMÉ

Les réservoirs d'acier installés sous terre sont utilisés pour l'emmagasinage des produits pétroliers et de ses dérivés depuis environ trente ans. La vie utile des réservoirs les plus âgés est maintenant dépassée, et les problèmes de fuites dus à la corrosion de ceux-ci sont nombreux. L'âge des réservoirs n'est qu'un des facteurs pouvant être responsable des fuites. Ces fuites peuvent contaminer le sol et les eaux avoisinantes.

La présente étude couvre sommairement les différentes techniques de récupération et de traitement applicables à l'eau et au sol contaminés. La détection et la prévention font l'objet d'une brève discussion parce qu'elles sont directement reliées à l'intervention. Quelques types d'équipements existant sur le marché sont également décrits.

ABSTRACT

Steel tanks have been used for the underground storage of petroleum products and derivatives for about forty years. The oldest tanks have now exceeded their design life and product leaks related to corrosion problems are increasing. The length of the tanks' life is one of several factors which could result in a petroleum product leak. These leaks can contaminate soil and water in the immediate surroundings.

The different recovery and treatment techniques applicable to hydrocarbon contaminated soil and water due to underground storage tank leaks are summarized in this report. Detection and prevention are briefly discussed and some examples of available equipment are given.

AVIS

Le présent rapport a été revu par la Direction du développement technologique et des services techniques, qui en a approuvé la publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement que le contenu reflète les vus et les politiques d'Environnement Canada. La mention de marques de commerce ou de produits commerciaux ne constitue pas une recommandation ou une approbation de leur utilisation.

COMMENTAIRES

Les lecteurs qui désirent commenter le présent rapport peuvent adresser leurs commentaires à:

F. Laperrière
Centre environnemental de River Road
Direction du développement technologique et des services techniques
Conservation et Protection
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0H3

TABLE DES MATIÈRES

Résumé/Abstract		III
Liste des tableaux		VI
Liste des figures		VII
1	INTRODUCTION	1
2	DÉTECTION	2
2.1	Inventaire des stocks	2
2.2	Essais d'étanchéité	3
2.3	Capteurs et équipement de détection	4
3	PRÉVENTION	9
3.1	Corrosion	9
3.1.1	Protection cathodique	9
3.1.2	Revêtements intérieur et extérieur des réservoirs	10
3.1.3	Réservoirs	11
3.1.4	Surveillance de la corrosion	11
3.2	Confinement secondaire	13
3.2.1	Chemisages	14
3.2.2	Écrans	15
3.2.3	Caisson	15
3.3	Autres méthodes	15
3.3.1	Cartouche de granulés absorbants	16
3.3.2	Soupape d'arrêt	16
4	INTERVENTION	17
4.1	Mesures initiales	17
4.2	Mesures à long terme	24
4.2.1	Récupération de l'eau souterraine	24
4.2.2	Traitement de l'eau souterraine	41
4.2.3	Récupération des sols contaminés	53
4.2.4	Traitement du sol	54
Références		68
Bibliographie		72
Annexe	**Liste partielle des distributeurs/fournisseurs, entreprises et organismes consultés**	73

LISTE DES TABLEAUX

1	MÉTHODES D'ESSAI D'ÉTANCHÉITÉ DES RÉSERVOIRS	5
2	TYPES DE DÉTECTEURS	7
3	COMPARAISON DE QUELQUES DÉTECTEURS COMMERCIAUX	8
4	COMPARAISON DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX DE FABRICATION DES RÉSERVOIRS	12
5	SOURCES DE FUITE POSSIBLES	18
6	QUESTIONS À POSER AUX PROPRIÉTAIRES OU EXPLOITANTS DES RÉSERVOIRS	19
7	MÉTHODES ET ÉQUIPEMENT DE FORAGE	21
8	DISPOSITIFS DE MESURE DE L'EAU SOUTERRAINE	23
9	COMMENT ÉVITER LES PROBLÈMES COURANTS AU COURS DE L'APPLICATION DE MESURES CORRECTIVES	26
10	ÉQUIPEMENT DE RÉCUPÉRATION DE L'EAU SOUTERRAINE ET AUTRES PRODUITS	42
11	TECHNOLOGIE DE FIXATION	60
12	SYSTÈMES DE FIXATION	61

LISTE DES FIGURES

1	CÔNE DE DÉPRESSION FORMÉ PAR POMPAGE	25
2	INTERCEPTION DE L'ÉCOULEMENT PAR UNE TRANCHÉE CONSTRUITE EN TRAVERS DU CHEMINEMENT DE MIGRATION	28
3	TRANCHÉE DE RÉCUPÉRATION AVEC PUISARD	29
4	CONSTRUCTION D'UN PUITS	31
5	ESPACEMENT DES POINTS DE RÉCUPÉRATION EN ZONE CONTAMINÉE	33
6	SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À POMPE UNIQUE	34
7	SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À DEUX POMPES	35
8	SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À DEUX POMPES ET DEUX PUITS	36
9	SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À POMPE ET ÉCRÉMEUR	37
10	PUITS DOUBLE	38
11	COMBINAISON PUITS ET CHAMBRES DE RÉCUPÉRATION	39
12	CUVETTE DE RÉCUPÉRATION	40
13	CUVETTE DE RÉCUPÉRATION AVEC BARRIÈRE DÉFLECTRICE	41
14	SÉPARATION PAR GRAVITÉ	51
15	ÉLIMINATION DES VAPEURS PAR ÉVENTS	65
16	SYSTÈME D'ADSORPTION DE LA PHASE VAPEUR	66

1 INTRODUCTION

Au cours des années 1950 et 1960, des milliers de réservoirs de stockage souterrains ont été installés, principalement dans des stations-service. La grande majorité d'entre eux, en acier non allié, arrivent à la fin de leur vie utile, et il s'ensuit un accroissement des fuites dans le sol (1). Cependant, on estime que moins de 25 p. 100 du total de ces fuites sont rapportés, et dans la plupart des cas, les pertes réelles sont nettement supérieures à celles qui sont déclarées (2).

Les fuites de produits pétroliers dans le sous-sol créent de nombreux problèmes comme la contamination des eaux souterraines, les explosions et les risques d'incendie lorsque les produits liquides ou les vapeurs pénètrent dans les étages inférieurs des édifices, ainsi que la dégradation des canalisations des services publics lorsqu'elles sont en contact avec les hydrocarbures libérés. Ces hydrocarbures peuvent stagner pendant de longues périodes, soit sous forme de film adhérant aux particules du sol, soit sous forme d'huile flottant à la surface de la nappe phréatique. Si cet état de chose n'est pas détecté, la contamination de l'eau et du sol peut durer pendant de nombreuses années et se propager. Les coûts du nettoyage peuvent varier de 25 000 $ pour la réparation des réservoirs à 90 000 $ pour leur remplacement, et jusqu'à un million de dollars s'il y a contamination des eaux souterraines* (3).

On met au point à l'heure actuelle des méthodes de lutte contre les fuites dès qu'elles ont été détectées. Les propriétaires de réservoirs réalisent l'importance de la prévention et de la détection des fuites aussi rapidement que possible, étant donné le coût important des mesures à prendre. Le présent rapport traite de ces sujets ainsi que des moyens de traiter le sol et l'eau contaminés par de telles fuites.

---

* Sauf indication contraire, ces chiffres sont en dollars canadiens (1986).

2 DÉTECTION

Les mérites d'une détection rapide d'une fuite sont évidents si l'on considère le coût élevé du nettoyage des lieux pollués et de la récupération des produits répandus, et ces coûts augmentent très rapidement si la fuite n'est pas détectée rapidement.

Il existe trois méthodes de détection des fuites, qui peuvent être employées seules ou en combinaison: l'inventaire des stocks, la vérification périodique des réservoirs et l'utilisation de systèmes de détection de fuites et de capteurs.

2.1 Inventaire des stocks

L'inventaire des stocks est sans doute la méthode la plus simple et la moins coûteuse pour détecter les fuites de réservoirs. On mesure le volume du produit emmagasiné dans un réservoir, généralement à l'aide d'une jauge, et on le compare au volume théoriquement stocké (différence entre le volume livré et le volume vendu). On enduit souvent la jauge d'une pâte spéciale qui permet de déceler la présence éventuelle d'eau dans le réservoir, ce qui est un signe possible de fuite.

La principale difficulté que présente cette méthode tient à la mesure précise d'un volume important de liquide volatil. Une partie de ce liquide peut, de fait, s'évaporer et occuper la partie vide du réservoir sous forme d'un mélange de vapeur et d'air. Ce mélange peut être libéré lors du remplissage du réservoir ou augmenter par suite des élévations de température (de 0,0007 à 0,0016 de variation de volume par degré Celsius pour les produits pétroliers et 0,0011 pour l'essence) (4). Ce phénomène doit être considéré comme une source d'erreur lorsque l'on procède à des mesures volumétriques. Afin de minimiser cette erreur, il faut noter en même temps la température du produit livré et celle à l'intérieur du réservoir avant d'appliquer un facteur de correction. Un écart d'un degré entraîne une erreur de 22 litres dans un réservoir d'essence de 20 000 litres (0,11 p. 100 d'erreur). Un autre problème vient de la précision de la mesure avec une jauge, méthode cependant utilisée couramment. L'erreur de lecture de la jauge, en supposant qu'une méthode appropriée et normalisée ait été suivie, est de 1 à 13 mm, soit de 13 à 218 litres dans un réservoir de 20 000 litres (0,06 à 1,1 p. 100). La précision exigée en ce qui concerne les compteurs de livraison est de 0,5 p. 100, soit 100 litres dans un réservoir de 20 000 litres. Il est donc possible que l'erreur totale soit de 1,71 p. 100 (340 litres dans le cas d'un réservoir de 20 000 litres) pour une différence de 1° seulement dans le relevé des températures (5), et l'erreur peut être plus grande si la différence de température augmente.

Certaines erreurs ne sont pas cumulatives et peuvent s'annuler avec le temps. Les erreurs de mesure ne se cumulent pas et, si l'on applique des méthodes appropriées, les erreurs dans la correction des températures se compensent. Les fuites se présentent sous forme d'une série de sommes dont la valeur va en croissant, tandis que les erreurs de mesure se traduisent par des fluctuations erratiques. Il faut donc reporter **tous les jours** sur un graphique les sommes accumulées afin de déterminer les tendances. Les erreurs systématiques se présentent aussi sous forme de tendances, aussi faut-il contrôler avec soin le volume stocké en suivant des normes établies (6).

L'inventaire des stocks devrait permettre de détecter les fuites des réservoirs dans un délai d'un mois, si elles sont de faible importance (c.-à-d. inférieures à 0,5 p. 100 du volume du réservoir), ou plus rapidement si elles sont plus importantes. Les différences supérieures à 0,5 p. 100 entre le volume total livré et la mesure des volumes dans les réservoirs devraient être étudiées sur une base quotidienne et comprendre le contrôle et l'étalonnage des débitmètres, tout en ne négligeant pas la possibilité de déversements au moment de la livraison ou de vol. En cas d'incertitude, il faut vérifier l'état des réservoirs et des conduites (3, 7).

2.2 Essais d'étanchéité

Bien que les essais d'étanchéité ne permettent pas de détecter une fuite au moment où elle se produit, ils font partie intégrante d'un programme de détection efficace des fuites. La National Fire Protection Association (NFPA) aux États-Unis (8) exige que les essais permettent de détecter des fuites de seulement 0,19 litre par heure, compte tenu de variable (9) comme les changements de température du produit, la déflexion de l'extrémité du réservoir, la stratification du produit, ainsi que les poches de vapeur.

Le coefficient thermique moyen de dilatation de l'essence est de 0,0011/°C alors qu'il est de 0,0002 pour l'eau à 17,2 °C. Si l'on ne tient pas compte de ce coefficient pendant l'essai d'étanchéité, un changement de température du produit peut fausser les résultats et indiquer un gain ou une perte. De façon plus précise, il est possible qu'une fuite ne puisse pas être décelée à cause de la dilatation du produit.

Lorsque la pression hydrostatique dans le réservoir augmente ou diminue, les extrémités des réservoirs se déforment. Cela crée une perte "apparente" de volume de liquide si l'on n'effectue pas la correction qui s'impose. Les produits se stratifient lorsqu'on leur ajoute un produit froid à un produit résiduel plus chaud (ou vice versa); tel est le cas des hydrocarbures ayant des températures différentes. Tous les essais doivent

donc comprendre l'établissement de la moyenne des différences de température du produit, étant donné que le gradient de température n'est pas toujours le même. Les changements de température et de pression ont une grande influence sur les poches de vapeur et peuvent entraîner des résultats erratiques. On y pallie cependant facilement en aérant le réservoir, en le remplissant lentement afin de minimiser les turbulences, ou en refroidissant le produit. Enfin, les essais d'étanchéité des réservoirs devraient être effectués rapidement avec des appareils portatifs, être faciles à faire et à peu de frais (9).

Il existe actuellement diverses méthodes d'essai commerciales, entre autres le Hunter Leak Lokator LD-2000 (anciennement Sunmark Leak Lokator), le Heath Petro-Tite (anciennement Kent-Moore), le Ethyl J-Tube Manometer, le VacuTect, le Horner Ezy-Check, les essais à l'hélium, ainsi que les essais hydrostatiques et pneumatiques. Ces essais, ainsi que d'autres qui sont actuellement en cours d'élaboration, sont présentés brièvement au tableau 1. Certains d'entre eux seulement répondent aux exigences de la NFPA aux États-Unis. On peut obtenir de l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis les résultats d'une évaluation comparative de l'efficacité de diverses méthodes de détection des fuites appliquées à un réservoir équipé d'instruments appropriés. La Petroleum Association for the Conservation of the Environment (PACE) a présenté ces méthodes d'essai dans certains rapports et symposiums (10, 11). On peut dire, de manière générale, que non seulement les essais hydrostatiques et pneumatiques ne permettent pas de vérifier si un réservoir fuit, mais qu'ils risquent d'entraîner des ruptures du réservoir et des tuyauteries.

2.3 Capteurs et équipement de détection

Un essai efficace de détection des fuites peut indiquer l'état d'un réservoir souterrain, mais il est nécessaire d'utiliser des capteurs et un équipement de détection pour assurer une surveillance constante. Le contrôle interstitiel des réservoirs à double parois à l'aide d'un fluide ou d'un capteur manométrique ainsi que des grillages, des puits d'observation, des tubes en U et des capteurs disposés autour du réservoir (12) peuvent servir à détecter les fuites. Il faut tenir compte de certains critères lorsque l'on choisit un système, en particulier les coûts, la possibilité de procéder à une détection continue ou intermittente, la sensibilité, l'effet des bruits de fond normaux sur le dispositif, la possibilité de fausses alarmes, la facilité d'entretien et la possibilité d'installer le système après réadaptation (13). Le tableau 2 indique divers types de détecteurs, et le tableau 3 présente certains équipements disponibles sur le marché.

TABLEAU 1 MÉTHODES D'ESSAI D'ÉTANCHÉITÉ DES RÉSERVOIRS

Méthode	Description	Avantages	Inconvénients	Durée de l'essai	Précision (d'après les fabricants)	Coût de l'essai
Essai de pression (air ou autres gaz)	Le réservoir est mis sous pression et l'on recherche les fuites d'air (1).	- Peu coûteux - Facile	- Pas concluant - Peut provoquer la rupture ou l'explosion du réservoir - Peut entraîner le produit à l'extérieur		- Ne peut détecter que les fuites importantes - N'indique seulement que le réservoir fuit ou ne fuit pas	
Essai hydrostatique (essai en colonne montante) (effectué par les services de pompage et les compagnies de services pétrolières)	Le réservoir est complètement rempli et stabilisé, la pression à l'intérieur est élevée de 35 à 55 kPa (5 à 8 lb/po^2) à l'aide d'une pompe ou en ajoutant des hydrocarbures identiques. On déduit qu'il y a une fuite si la pression baisse de 20 kPa (3 lb/po^2) en 15 mn; si la pression se maintient pendant 1 h, le réservoir est étanche (3).	- Peu coûteux - Facile	- Ne tient pas compte des fluctuations de température - Peut provoquer la rupture du réservoir ou de la tuyauterie - Le réservoir doit être rempli	- 9 h + temps de stabilisation après remplissage - 2 h pour l'essai	- Signale seulement que le réservoir fuit	- 330 $US (1986) par réservoir (3)
Hunter Leak Lokator LD-2000 (anciennement Sunmark Leak Lokator)	Le fonctionnement du détecteur est basé sur le principe d'Archimède: un capteur creux rempli du même fluide que celui du réservoir est suspendu à une balance sensible et partiellement immergée dans le réservoir. La poussée subie par le capteur est directement proportionnelle aux changements de niveau du fluide. On peut évaluer l'importance de la fuite en mesurant le déplacement massique (3, 10, 11).	- Aucun besoin de mise sous pression du réservoir - Permet de vérifier trois réservoirs en même temps - Le réservoir n'a pas besoin d'être plein - Compense les changements de température de 0,001 °C		- 2 h pour stabilisation de la température avant l'essai - 2 h pour l'essai d'un réservoir	- 0,2 litre/h	- 300 $ par réservoir (station-service) - 650 $ à 1000 $US (1986) par réservoir (ind.) plus le coût du transport (3), service par contrat seulement
Heath Petro-Tite (anciennement Kent-Moore) (essai hydrostatique modifié)	Résultats basés sur la quantité de produit ajouté dans une colonne montante branchée extérieurement pour maintenir un niveau constant du liquide. Une pompe de circulation est placée au sommet. La température du produit est surveillée pendant tout l'essai et corrigée, si nécessaire (4, 10, 11).	- Compense la stratification par la température et corrige la dilatation (0,003 °C) ainsi que la déformation des extrémités du réservoir	- Le réservoir doit être complètement plein	- 6 h + temps de stabilisation (ou plus par temps froid) - 3 h pour l'essai	- 0,2 litre/h	- 350 $US (1986) par réservoir (3)
Horner Ezy-Check	Un mince filet d'air est envoyé sous pression dans le produit, par le haut, à 1,3 cm (0,5 po) de profondeur, et l'on mesure la pression nécessaire pour maintenir un débit continu de bulles. On peut relever un changement de 0,025 cm (1/100 po) dans le niveau du liquide. La température du produit est surveillée pendant l'essai (3).	- Permet de vérifier deux réservoirs à la fois - Corrige la dilatation, la stratification de la température (0,001 °C)	- Le réservoir doit être plein	- 6 h pour stabilisation après remplissage - 1 à 2 h pour l'essai	- 0,2 litre/h (équipement acheté après 1984 seulement)	- 250 $ l'essai pour le premier réservoir, 200 $ pour les réservoirs suivants ($US, 1986) (3)
Ethyl Tank Sentry (manomètre en J)	La branche la plus courte d'un manomètre en J est remplie d'un fluide "indicateur", tandis que la plus longue est remplie avec le fluide que contient le réservoir (en étant dans le réservoir). Lorsque le niveau du fluide dans le réservoir change, une partie du fluide indicateur est déplacée, ce qui indique la quantité de fluide qui s'est échappée pendant la période d'essai (3, 10, 11).	- Permet de vérifier trois réservoirs à la fois - Le réservoir n'a pas à être plein (plus le réservoir est plein plus la mesure est précise)	- Le détecteur est complètement immergé - Le réservoir est hors service pendant au moins une journée - L'indicateur est particulièrement approprié aux réservoirs d'essence. Son emploi pour le carburant diesel (gas-oil) n'est pas recommandé	- 24 h pour stabilisation de la température avant essai - 8 à 10 h pour l'essai	- On peut détecter des changements de niveau de 0,05 cm (par exemple, une fuite de 8 litres/h pour un réservoir de 30 300 litres)	- Service par contrat seulement

TABLEAU 1 (suite)

Méthode	Description	Avantages	Inconvénients	Durée de l'essai	Précision (d'après les fabricants)	Coût de l'essai
VacuTect (mis au point par Athabasca Research Ltd.)	La pression dans le réservoir est réduite par pompage du mélange air-vapeur du réservoir. L'air extérieur est aspiré par tous les orifices possibles et des bulles se forment sur la paroi du réservoir. Lorsque les bulles se détachent de la paroi, elles émettent un bruit particulier. L'interprétation de ce bruit permet de connaître l'importance et l'emplacement de la fuite. Des capteurs auxiliaires peuvent détecter les bulles d'eau qui pénètrent dans le réservoir lorsque la fuite se trouve en dessous du niveau de l'eau (3, 10, 11).	- Il n'est pas nécessaire que le réservoir soit plein - La température n'a pas d'effet sur l'essai - Essai à une pression inférieure à la pression atmosphérique - Sensible - Aucun temps de stabilisation	- Compliquée - Parfois fausses alarmes - Ne permet pas d'évaluer les taux de fuites	- 20 mn pour essai avec des bulles d'air - 3 h pour essai d'intrusion de l'eau	- Trous de 0,0006 cm de diamètre	- 400 $US (1986) par réservoir (3), service par contrat seulement
Système de détection de fuite à l'hélium (système Smith & Denison)	Le réservoir doit être complètement vide. Il est alors rempli d'hélium à une pression max. de 3 kPa. Toute fuite d'hélium du réservoir ou de sa tuyauterie peut être détectée à l'aide d'un détecteur d'hélium portatif dans des trous de 2,5 cm de diamètre percés dans la paroi du réservoir (3, 10, 11).	- Précise - Peut servir à détecter des fuites dans les conduites lors d'un essai indépendant	- Le capteur ne peut pas lire à travers la dalle de béton recouvrant le réservoir et le long des conduites - La durée de la détection dépend de la porosité et de l'humidité du sol environnant	- 1 journée de préparatifs - 1 h à 1 journée pour l'essai	- 0,2 litre/h	- Service par contrat seulement
Détecteur de fuite PACE (Shell Canada Ltd. pour PACE)	Le réservoir doit être rempli presque complètement jusqu'à la conduite de remplissage et isolé de l'atmosphère. Un changement du volume du vide au-dessus du niveau du produit dans la conduite, par suite d'une fuite, modifie la pression dans cette conduite. Le changement de pression est indiqué par une différence du niveau du liquide, décelée à l'aide d'un manomètre placé dans la conduite (3, 10, 11).		- Le réservoir doit être plein	- 12 h pour stabilisation avant l'essai - 1 à 2 h pour l'essai	- 0,2 litre/h	- Pas encore sur le marché (1986)
Détecteur de fuite Pald-2 (B.C. Research pour PACE)	Le réservoir doit être rempli à ras bords. On applique au moins 3 pressions différentes en injectant de l'azote dans un tube de section connue monté sur la conduite de remplissage du réservoir. Les changements de niveau dans le tube sont mesurés à l'aide de capteurs électro-optiques, et un microprocesseur calcule le taux de fuite (10, 11).		- Le réservoir doit être plein - Interférence du tassement du sol et des vibrations causées par la circulation	- 1 à 2 h pour l'essai (une mise sous pression pendant 30 mn ne semble pas appropriée à la détection d'un taux de fuite de 0,2 litre/h) - 6 h + temps de stabilisation avant l'essai	- 0,2 litre/h	- Pas encore sur le marché (1986)
Détecteur de fuite à faisceau laser (SRI International pour API)	Mesure le changement progressif de niveau de surface du réservoir à l'aide de deux faisceaux laser réfléchis par les coins d'un cube reposant sur des flotteurs dans une conduite installée dans le réservoir. Le taux de fuite est déterminé par un microprocesseur (3, 10, 11).	- Compense les changements de température - Le réservoir n'a pas besoin d'être plein	- Système complexe	- 1 journée de préparatifs - 3 h pour l'essai	- 0,4 litre/h	- Pas encore sur le marché (1986)
Détecteur de fuite de réservoir Mooney	Une sonde flottante à capacitance mesure les changements de niveau dans la conduite de remplissage du réservoir lorsqu'on ajoute et l'on ôte une quantité connue de liquide. Les changements de niveau sont calculés d'après les fluctuations de la température et comparés à des valeurs mesurées, de façon à déterminer le taux de fuite (3, 10, 11).	- Compense les différences de température	- Le réservoir doit être plein	- 12 h pour la stabilisation après remplissage - 1 h pour l'essai (38)	- 0,2 litre/h - Permet de mesurer des changements de niveau de 0,25 à 0,50 mm	- Équipement 3800 $US (1986) (3)

TABLEAU 2 TYPES DE DÉTECTEURS (13)

Type de détecteur	Détecte	Description	Remarques
Catalytique	Vapeur	Mesure le changement de résistance lorsque l'on brûle des hydrocarbures avec de l'oxygène sur un fil à revêtement catalytique.	- Sensible à une gamme limitée de concentrations au-dessus de 200 ppm - Réaction rapide - Ré-étalonnage périodique nécessaire - Certains composants de l'essence (par exemple, les alkyles de plomb) les contaminent; des capteurs résistant à cette contamination sont sur le marché
Semi-conducteur	Vapeur	Mesure le changement de résistance lorsqu'il y a adsorption d'hydrocarbures sur la couche de surface d'un conducteur.	- Fonctionne dans une large gamme de concentrations (efficacité optimale entre 2000 et 20 000 ppm) - Peu coûteux - Les modèles actuels ne sont pas interchangeables
Combustion à la flamme	Vapeur	Mesure l'élévation de température lorsque des hydrocarbures brûlent dans une flamme de propane.	- Résiste aux substances qui empoisonnent le catalyseur - Nécessite un entretien poussé et le remplacement du combustible propane - Coûteux
Conductivité thermique	Liquide	Fait la différence entre les liquides en mesurant le taux de refroidissement d'un thermistor préalablement chauffé.	- Permet la distinction entre l'air, l'eau et les hydrocarbures - Insensible aux couches d'hydrocarbures inférieures à 0,64 cm - Peut s'encrasser - Ancienne méthode, il existe de la documentation supplémentaire à son sujet
Conductivité électrique	Liquide	Mesure la conductivité électrique à l'aide de deux sondes.	- Faible coût - Efficacité moins prouvée
Optique	Liquide	Mesure la densité optique à travers un espace liquide ou l'indice de réfraction à l'extérieur d'une cellule de réflexion interne.	- Moins sensible que d'autres méthodes
Détérioration d'un câble par des hydrocarbures	Liquide	Les conducteurs se détériorent au contact des hydrocarbures liquides. Les courts-circuits qui en résultent déclenchent une alarme sonore.	- Le temps nécessaire pour déclencher l'alarme varie avec la nature de l'hydrocarbure et les conditions environnementales - Les hydrocarbures autres que ceux du réservoir dont on veut détecter les fuites déclenchent de fausses alarmes
Onde acoustique de surface (SAW)	Vapeur	Le capteur absorbe les vapeurs à l'aide d'un microcircuit résonnant contenant une plaque SAW. L'absorption modifie la fréquence de résonnance.	- Très sensible dans le cas de certains gaz - Devrait être peu coûteux, détection continue des hydrocarbures
Contrôle de l'air ambiant	Vapeur Liquide	On creuse un puits de surveillance dans la terre de remblayage du réservoir et l'on y place un tube perforé. Les fuites sont détectées par des dispositifs de détection de la vapeur ou par échantillonnage.	- Peu coûteux - Facile à installer et à utiliser - Le puits peut servir à déterminer l'écoulement de l'eau souterraine
Ultrasonique	Fissures dans le réservoir ou les conduites	On enregistre les réflexions des ultrasons sur les surfaces externes ou internes du réservoir. On établit des images à deux et trois dimensions qui permettent de déceler la longueur, la forme et la profondeur des anomalies.	- Utilisé principalement pour les conduites mais peut facilement s'appliquer aux réservoirs - Systèmes variant du scanner manuel aux modèles qui sont installés dans les réservoirs - Le système à technique comparative doit être étalonné, mais les normes peuvent varier d'un essai à l'autre - Les bruits de fond peuvent affecter les résultats de l'essai - Le personnel doit avoir la formation nécessaire pour interpréter correctement les données

TABLEAU 3 COMPARAISON DE QUELQUES DÉTECTEURS COMMERCIAUX

Type de détecteur	Dispositif	Remarques*	Coût
Câble dégradable	Câble détecteur Orbmah (Total containment)	- Le câble doit être en contact avec l'hydrocarbure pour déclencher l'alarme. Une fois le contact établi, l'alarme sonne au bout de 40 mn (dans l'essence) - Le temps de déclenchement de l'alarme est plus long pour les hydrocarbures plus visqueux et à des températures plus basses - Le câble doit être réparé après l'alarme et il est abîmé par les autres hydrocarbures	- 1200 $US (1985) (ensemble pour une installation à 4 réservoirs)
Conductivité thermique	Système Pollulert FP-102 (P.R. Mallory & Co.)	- Installé dans un puit creusé le long du réservoir (détecte les hydrocarbures liquides - épaisseur 0,3 cm - qui flottent sur l'eau souterraine) - L'alarme se déclenche entre 0 et 5 secondes après que les capteurs sont recouverts - Sondes réutilisables	- 500 $ à 800 $ pour les sondes - 1100 $ à 1200 $ pour les dispositifs de contrôle - 5500 $ pour le système (réservoir et conduite de remplissage) ($US, 1985)
Semi-conducteur	Soil Sentry (Genelco, Inc. - en voie d'être breveté)	- Système de contrôle des fuites souterraines totalement **automatique** - Les échantillons de vapeur sont envoyés dans l'appareil par une pompe aspirante - L'alarme se déclenche lorsque les échantillons de vapeur dépassent un certain seuil ou lorsque le niveau de vapeur détecté est extrêmement élevé	- 100 $ pour la sonde - 5000 $ pour le détecteur de gaz ($US, 1986)
Optique	Capteur optique de niveau liquide (OPW/OLLS)	- Bien qu'il serve à contrôler le niveau de liquide dans les réservoirs, il peut servir à la détection d'une façon très analogue au système Pollulert - Contrôle automatique et continu - Aucune énergie électrique nécessaire	- 200 $ à 250 $ pour les capteurs - 815 $ à 1700 $ pour le dispositif de contrôle - Environ 3500 $ pour le système (réservoir et conduite de remplissage ($CAN, 1985)

* D'après le fabricant.

3 PRÉVENTION

Tout programme de prévention des fuites devrait comprendre un système efficace de détection, mais il vaut mieux éviter que des fuites se produisent plutôt que de les détecter après coup. Pour cela, il faut protéger les réservoirs et les conduites souterraines contre la corrosion et éviter les débordements et les écoulements en cours d'exploitation. Les programmes de prévention devraient aussi comporter une analyse prévisionnelle portant sur le vieillissement des réservoirs.

Le présent chapitre traite brièvement de la prévention et du confinement secondaire. Si ce dernier ne permet pas d'éviter que des fuites se produisent, il permet cependant d'éviter que les produits ne se répandent sur une zone étendue.

3.1 Corrosion

Un grand nombre des réservoirs souterrains installés dans les années 1950 et actuellement en service sont en acier non allié nu qui risque de se corroder, le plus souvent sous l'effet de l'interaction des réservoirs et conduites et des éléments environnants tant internes qu'externes. Le matériau qui a servi à fabriquer un réservoir est évidemment important, mais des méthodes d'installation inappropriées peuvent accroître les risques de corrosion. Par exemple, si la surface de réservoirs en acier revêtus extérieurement est rayée accidentellement lors de l'installation, une corrosion localisée accélérée peut se produire (1).

Des mesures préventives s'imposent pour éviter la corrosion. Trois méthodes de base peuvent être appliquées: la protection cathodique, les revêtements intérieurs et extérieurs, et l'utilisation de matériaux non corrosifs. De plus, il faudrait procéder à des contrôles permettant de prévoir, en fonction des conditions du sol et de l'âge du réservoir, la possibilité qu'un réservoir se mette à fuir et le moment où cela pourrait se produire.

3.1.1 Protection cathodique. - Il y a corrosion lorsque quatre éléments sont réunis: une anode, une cathode, un électrolyte et un courant électrique, ce qui forme un circuit complet. La protection cathodique fait du réservoir la cathode, ou l'élément protégé, ce qui inverse l'effet de la corrosion. Il existe deux types de protections cathodiques: par anode galvanique (ou anode sacrifiée) et par courant appliqué. Un système de protection cathodique type pour un réservoir existant de 15 000 litres coûterait environ 625 $CAN, (1981) (13). Le coût d'un nouveau réservoir en acier revêtu, installé et équipé d'une protection cathodique, est d'environ 10 p. 100 supérieur à celui d'un réservoir nu.

Anode galvanique. - Certains métaux (par exemple, le magnésium, l'aluminium et le zinc) sont plus sensibles à la corrosion que l'acier. Lorsqu'ils sont en contact avec un réservoir en acier, ils deviennent l'anode et subissent la corrosion, tandis que le réservoir devient la cathode. Le nombre d'anodes nécessaires pour un réservoir dépend des conditions du sol. Un sol dont la résistivité est faible est un meilleur conducteur, et l'anode a une action plus forte. Dans le cas des anodes en magnésium, on peut s'attendre à ce que leur durée de vie soit courte. Si l'on revêt le réservoir d'une bonne couche diélectrique, on peut cependant réduire le nombre d'anodes nécessaires, et c'est ce que recommandent les normes ULC S603.1-M1982*. Avec ce dispositif, le réservoir doit être isolé électriquement des structures, mais on peut le surveiller facilement aux postes d'essai à la surface du sol. Ce système est généralement utilisé pour les nouveaux réservoirs, étant donné que l'isolation électrique et le revêtement permettent une exploitation économique (13).

Courant appliqué. - Cette technique consiste à utiliser une source d'alimentation électrique externe et des matériaux semi-inertes pour former les anodes. Un courant alternatif provenant du secteur est redressé dans le sol par l'intermédiaire d'anodes semi-inertes, généralement en graphite, en fonte à haute teneur en silicium ou constituées par un support métallique recouvert de platine. Non seulement ce système permet de protéger des réservoirs en place revêtus ou non isolés lorsqu'on l'utilise avant que la corrosion soit devenue importante, mais on peut faire varier la tension électrique selon les conditions du sol et de l'eau souterraine. Ce système de protection est plus coûteux que le système à anode sacrifiée pour un réservoir neuf de 15 000 litres (environ 1250 $CAN, 1981 (14)) car il faut l'alimenter en courant continu, mais il en coûte moins cher que de remplacer le réservoir. Parmi les risques possibles reste celui d'endommager des installations souterraines voisines, ou qu'une panne de courant supprime la protection (13).

3.1.2 Revêtements intérieur et extérieur des réservoirs. - Les revêtements n'assurent pas à eux seuls une protection adéquate, mais ils permettent de prévenir la corrosion si on leur allie la protection cathodique. Cependant, si le revêtement comporte des trous d'épingle, le métal à nu est sujet à une corrosion localisée accélérée. Même dans le cas de la protection cathodique, les imperfections du revêtement nuisent à la durée de vie des anodes ou entraînent une augmentation du courant nécessaire dans le

---

* Normes des Laboratoires des assureurs du Canada pour l'installation des réservoirs souterrains.

cas des systèmes à courant appliqué. Un revêtement doit donc être très résistant et il doit recouvrir complètement la surface à protéger. Il faut manipuler avec soin les réservoirs au cours de l'installation afin de ne pas les endommager. Le revêtement doit être inspecté et retouché (avec le même matériau) sur place avant et après la mise en place du réservoir dans la fosse (11).

Parmi les types de matériaux de revêtement des réservoirs citons: l'asphalte, l'époxy, le plastique renforcé de fibre de verre, les silicones, le caoutchouc, le polyéthylène et le béton (1, 3). On utilise généralement des revêtements d'époxy au goudron de 0,3 à 0,4 mm d'épaisseur. Ce produit peut être appliqué à froid par pulvérisation ou au pinceau, sans qu'une couche de base soit nécessaire, et il a un pouvoir d'adhérence excellent, une excellente résistance à l'éraillement, une bonne durabilité, ainsi qu'une bonne résistance à l'essence. Cependant, il a une durée de vie limitée et nécessite une préparation méticuleuse de la surface (11). Ce produit coûte de 1,50 $ à 2,25 $ le pied carré, alors que le revêtement de fibre de verre appliqué par pulvérisation coûte entre 7 $ et 8 $ le pied carré ($CAN, 1986) (Marclin Industries). On peut aussi utiliser du béton et du caoutchouc, mais ces deux produits sont très chers et le caoutchouc n'offre qu'une résistance limitée aux hydrocarbures.

Le choix du revêtement et la décision de l'appliquer à l'intérieur ou à l'extérieur du réservoir dépendent du montant que son propriétaire peut ou veut y consacrer. Il ne faut cependant pas oublier que le revêtement doit satisfaire à certaines exigences minimales et que les installateurs doivent respecter des méthodes globales d'application sur place. Il est de la plus haute importance que le réservoir soit en **parfait état** si l'on veut lui appliquer un revêtement.

3.1.3 Réservoirs. - Les matériaux avec lesquels on peut fabriquer les réservoirs sont indiqués et brièvement analysés au tableau 4. Il existe des normes sur l'installation et les conditions concernant les réservoirs souterrains de stockage en acier (Underwriters' Laboratories of Canada; ULC S603-M1981 et S603.1-M1982) et pour les réservoirs en plastique renforcé pour les produits pétroliers (ULC CAN4-S615-M1983). De plus, il conviendrait d'étudier plus en détail de nouveaux matériaux, comme l'agrégat "K-crete", qui peuvent être utilisés pour le remplissage et assurer une compacité de 100 p. 100 s'ils sont utilisés convenablement.

3.1.4 Surveillance de la corrosion. - La durée de vie d'un réservoir en acier nu, non protégé, peut varier entre 5 et 50 ans ou plus (15), et son environnement immédiat joue un rôle important. Il est donc recommandé de procéder à un examen de la corrosion des

TABLEAU 4 COMPARAISON DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX DE FABRICATION DES RÉSERVOIRS

Type de réservoir	Remarques sur l'installation	Remarques générales
Acier	- Faire attention au matériau de remblayage. Il ne devrait pas contenir de scories ni de matières étrangères qui pourraient former les cathodes d'une cellule de corrosion - Le matériau de remblayage doit être tassé et le réservoir fixé par ancrage	- Les réservoirs en acier nu sont sensibles à la corrosion; dans certaines conditions, ils peuvent se détériorer dans les 5 ans suivant leur installation - Coût pour un réservoir de 15 000 l: acier nu: 1800 $; avec protection anticorrosion: 2600 $ ($CAN, 1986) (Marclin Industries)
Plastique renforcé à la fibre de verre (FRP)	- Le matériau de remblayage assure 90 % du soutien du réservoir (circonférence et extrémités); utiliser du sable, du gravier (50) - Accorder un soin particulier à l'installation dans les sols gelés ou s'il y a des nappes phréatiques à niveau élevé (14)	- Résistance à la corrosion, aucun entretien (14) - La compatibilité du produit stocké et du réservoir est importante - Réparations possibles - Possibilités de réutilisation après excavation et contrôle approprié - Coûts pour un réservoir de 13 600 l, 3800 $ ($CAN, 1986) (CAE); frais d'installation: environ 1000 $ de plus que pour un réservoir en acier - Remarque: Différence de prix négligeable entre un réservoir FRP et un réservoir ULC 603.1 avec l'augmentation de capacité (14)
Acier plaqué en plastique et renforcé à la fibre de verre	- Installation à peu près semblable à celle des réservoirs en acier, sauf qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une protection cathodique et qu'il faut prendre soin de ne pas percer la couche de fibre de verre (100 mm d'épaisseur) (3)	- Utilisé essentiellement pour le stockage de produits abrasifs - Possibilité de décollement du fait que la fibre de verre et l'acier ont des taux de dilatation différents
Acier à double paroi	- Même installation que pour les réservoirs en acier à simple paroi - Généralement installé avec revêtement protecteur (fibre de verre) ou protection cathodique	- L'espace entre les deux parois est mis sous vide ou sous pression; la perte de vide (ou de pression) (perforation) est indiquée par un dispositif de contrôle - Coûte deux fois plus cher que les réservoirs à paroi simple ULC 603.1 (14) - Utilisé lorsque les risques pour la sécurité de l'environnement sont élevés
Béton	- Les réservoirs en béton sont généralement construits sur place (on creuse la fosse, place le moule et verse le béton dans la fosse) - Tenir compte des mouvements du sol et des conditions de gel	- Coût actuellement très élevé - Lorsqu'on utilise ces réservoirs en combinaison avec des chemisages imperméables, ils représentent un très bon moyen de stockage des hydrocarbures (durée de vie longue, à l'épreuve de la corrosion)

réservoirs avant d'envisager des mesures d'amélioration. La corrélation entre l'âge du réservoir et son environnement permet d'évaluer les probabilités de défaillances dues à la corrosion et le moment où elles pourraient se produire. Il conviendrait de procéder à cette étude soit avant, soit juste après l'installation du réservoir dans sa fosse. Deux méthodes d'étude applicables sont décrites ci-dessous.

Une approche mise au point par un groupe de travail de PACE consiste à utiliser un indice réservoir-sol comme principal critère d'évaluation. Ce nombre est le produit de l'âge du réservoir et de la valeur de l'agressivité du sol. Cette valeur est calculée par un système de points qui comprend la résistivité du sol, son pH, son humidité, la présence de sulfures et les valeurs différentielles de ces éléments. Une étude des fuites de réservoirs de toutes les compagnies pétrolières canadiennes a montré que les sites où l'indice réservoir-sol était inférieur à 69 ne représentaient que 5 p. 100 des fuites dues à la corrosion; les sites où l'indice était inférieur ou égal à 180 représentaient 40 p. 100; et les sites où cet indice était supérieur à 180 représentaient 60 p. 100. Des mesures de correction appropriées ont été recommandées sur la base de cet indice.

a) Pour un indice réservoir-sol inférieur à 69, il faudrait procéder à une analyse des risques que court l'environnement.

b) Pour un indice réservoir-sol compris entre 69 et 180, il faudrait procéder à un essai de fuite.

c) Pour un indice réservoir-sol supérieur à 180, il faudrait remplacer le réservoir (11).

L'autre méthode a été mise au point par Warren Rogers Associates Inc. pour l'American Petroleum Institute (API) et consiste à évaluer l'âge auquel un réservoir risque de se détériorer sous l'effet de la corrosion externe en se fondant sur des mesures physiques sur le site (par exemple, la résistivité du sol, son humidité, la présence de sulfures et la taille du réservoir), que l'on met en équation. Les probabilités et limites de confiance pour des âges particuliers peuvent alors être calculées; l'âge d'un réservoir présentant des fuites est supposé suivre une distribution normale. Les chercheurs ont aussi mis au point une équation permettant de prévoir les détériorations dues à la corrosion interne, y compris l'âge moyen du réservoir à l'apparition des détériorations et la probabilité de détérioration à tout âge donné pour un volume de ventes donné et une fréquence de remplissage donnée (3, 11).

3.2 Confinement secondaire

L'une des principales difficultés qu'entraînent les fuites souterraines est le fait que le produit peut, selon le type de sol et le niveau de la nappe phréatique,

contaminer de grands volumes de sol et d'eau. On peut pallier à ce problème en installant un système de confinement secondaire destiné à empêcher les contaminants de se propager, ce qui peut être réalisé à l'aide de réservoirs à double paroi, chemisages, écrans et voûtes en béton.

3.2.1 Chemisages. - On peut utiliser des produits naturels (argile) ou synthétiques (membranes). Parmi les membranes disponibles sur le marché, celles qui sont compatibles avec les hydrocarbures et conviennent au confinement secondaire sont en éthers d'uréthane ou en esters d'uréthane ou en polyéthylène de densité élevée. Les autres chemisages en polyéthylènes chlorés, chlorures de polyvinyle résistant aux huiles, caoutchouc butyle, polyéthylènes chlorosulphonatés, néoprène, éthylène et monomèrediène de propylène ont une faible résistance aux hydrocarbures ou aux conditions environnementales rudes et ne seraient pas efficaces comme produits de confinement secondaire (16, 17, 18, 19). Parmi ces matériaux, le polyéthylène à densité élevée est celui qui résiste au plus grand nombre de produits chimiques, y compris ceux que l'on utilise généralement comme additifs dans les produits pétroliers. On trouve dans le commerce du polyéthylène à densité élevée dont l'épaisseur peut varier de 10 à 100 mils (0,254 à 2,54 mm), et le client peut faire son choix en fonction de considérations financières, de la manipulation et du type de produit à stocker dans le réservoir. La membrane peut être placée soit directement sur le matériau de remblayage, soit autour du réservoir. Dans le premier cas, il existe deux méthodes courantes. La première consiste à enterrer une feuille épaisse (100 mils) de polyéthylène à densité élevée dans le remblayage, mais ces feuilles ont 7 m de large et leur manipulation est difficile. L'utilisation d'une membrane peut présenter d'autres problèmes. Par exemple, des températures élevées peuvent provoquer leur rupture, et il faut alors faire appel à des spécialistes pour corriger le problème (la membrane doit être soudée). Une membrane épaisse n'est pas aussi flexible et facile à manipuler que des feuilles minces, et il faut éliminer les objets pointus que peut contenir le matériau de remblayage afin de ne pas percer la membrane.

La seconde méthode recourt à une mince membrane (20 mils) placée entre deux géotextiles (tissus synthétiques servant aux constructions en contact avec le sol ou à des applications géotechniques). Les géotextiles sont solides et poreux, ils sont résistants et assurent un soutien. Le polyéthylène à densité élevée sert d'écran aux hydrocarbures. Nul besoin d'un technicien pour installer ce système et, étant donné que la membrane ne risque pas de se déchirer, il n'est pas nécessaire de prendre autant de précautions en ce qui concerne le matériau de remblayage.

Il est également possible de souder une membrane (généralement en polyéthylène à densité élevée) autour du réservoir. Ce dernier est d'abord enveloppé d'un matériau à mailles qui sert à protéger la membrane et à assurer un espace entre le réservoir et elle. On installe un système de détection des fuites ainsi qu'un dispositif qui permet de maintenir un pH constant dans l'anneau ainsi formé. Ce dispositif est nécessaire car il y a inévitablement de l'eau dans l'anneau, et le réservoir pourrait se corroder si le pH devenait trop faible. Le détecteur de fuites doit être installé de façon à pouvoir être enlevé sans avoir à déterrer le réservoir. On peut aussi placer des manchons sur les conduites d'arrivée ou de sortie du réservoir.

3.2.2 Écrans. - Il existe différents types d'écrans. Les écrans en argile sont les moins coûteux, mais ils sont susceptibles de se fracturer, en particulier sous l'effet des mouvements du sol. Il existe d'autres écrans composés d'un grand nombre de matériaux divers: mélanges (boues) de sol-bentonite et ciment-bentonite et leurs variantes, ainsi que des émulsions à base d'asphalte; parois de plastique-béton ou de béton maigre; diaphragmes ou parois rigides en béton; zones gelées localisées en sous-sol (généralement pour une utilisation de courte durée); parois en palplanche ou panneaux accouplés enfoncés dans le sol; et, plus récemment, membranes synthétiques. Leur installation nécessite généralement le creusage de tranchées, l'injection de produits chimiques ou de matériaux en suspension (injection sous pression dans les interstices ou les fractures des milieux géologiques fracturés ou poreux d'un "coulis" de matériau semi-liquide ou d'une consistance semblable à celle de la boue) ou la technique de la poutre vibrante. Les écrans de boues présentent des inconvénients, en ce sens que leur mise en place peut être difficile, que leur état est difficile à vérifier pendant ou après leur mise en place, et que l'échantillonnage du matériau composant l'écran peut l'endommager (20).

3.2.3 Caisson. - Le caisson est sans doute le dispositif le plus sûr de confinement secondaire, mais aussi le plus coûteux. Un caisson en béton est mis en place dans le sol et le réservoir est placé à l'intérieur, puis l'on ajoute le matériau de remblayage nécessaire. Le caisson est équipé de dispositifs de surveillance continue et l'ensemble de la structure est ensuite recouvert d'un toit en béton muni de regards. On utilise cette méthode dans les zones à risques élevés (par exemple, les zones urbaines ou les endroits où le sol est très perméable).

3.3 Autres méthodes

Une grande partie des fuites des réservoirs souterrains est due à l'erreur humaine. Un système de détection et de prévention perfectionné n'est valable que si des

mesures sont prises pour éviter les déversements accidentels, en particulier pendant le remplissage du réservoir. Pour ce faire, on peut installer dans la conduite de remplissage un dispositif d'obturation automatique comportant un garnissage formé d'un matériau pouvant absorber un volume limité de produits déversés ou une soupape d'arrêt.

3.3.1 Cartouche de granulés absorbants. - Les granulés absorbants sont formés de particules plastiques sphériques qui absorbent une grande diversité de liquides organiques. Le fluide est en fait absorbé dans la structure polymère des granulés, et une fois absorbé, il ne peut pas en ressortir. Certaines particules organiques, telles les particules polymères, peuvent absorber jusqu'à 27 fois leur volume initial, et gonfler au cours du processus jusqu'à atteindre une fois et demie à quatre fois leur diamètre initial. Lorsque ces granulés sont placés dans une cartouche, ils laissent passer l'eau, mais ils gonflent et empêchent tout écoulement lorsqu'ils entrent en contact avec des hydrocarbures. Un tel dispositif, branché à un tuyau de trop-plein de confinement secondaire, assure la protection supplémentaire nécessaire à la prévention des accidents. Ces cartouches ne coûtent pas cher (environ 1 $, 1986), mais leur remplacement est désagréable à effectuer car les granulés gonflés sont collants et difficiles à nettoyer. Il existe à présent un nouveau dispositif avec des granulés absorbants et son remplacement devrait être plus facile. La couleur du dispositif change lorsqu'il a servi, ce qui indique une fuite (voir l'annexe A: Emco, Anco).

3.3.2 Soupape d'arrêt. - Lorsqu'un réservoir fuit ou qu'il se produit un déversement accidentel, il faut éviter tout rejet dans les égouts. À cette fin, on peut installer dans les sorties vers les égouts une soupape d'arrêt conçue de façon à faire une distinction entre la densité de l'huile et celle de l'eau. Cette soupape n'évite pas les déversements, mais elle permet de les contenir.

4 INTERVENTION

4.1 Mesures initiales

Un réservoir de stockage souterrain qui fuit entraîne des difficultés particulières de nettoyage, étant donné que le polluant se répand sous terre. L'équipement classique utilisé, tels les dispersants, les écrémeurs et les absorbants, n'est généralement pas utilisable. Dans la plupart des cas, les premières mesures consistent à localiser la source de la fuite et à juger de l'étendue de l'écoulement, après avoir pris les précautions nécessaires pour protéger la population et les biens matériels. La situation peut s'aggraver si le polluant se déplace sur des milles sous terre à travers un sol et des roches poreux, des tranchées remplies de matériaux poreux, le long de canalisations ou de conduites, ou à travers des canalisations d'égouts.

Il faut suivre trois étapes principales pour localiser la source et l'étendue d'un déversement souterrain. Premièrement, il faut obtenir des informations sur les propriétés physicochimiques (densité, solubilité, volatilité, etc.) du polluant ainsi que sur sa composition chimique, la migration du produit pouvant dépendre de ces caractéristiques. Les hydrocarbures volatils peuvent présenter des problèmes particuliers, étant donné que l'accumulation de vapeurs dans le sol et dans les immeubles peut provoquer des explosions et constituer un risque pour la santé.

La deuxième étape consiste à trouver la source de la pollution. Le tableau 5 fournit la liste de certaines sources possibles, qu'il faut vérifier s'il s'agit d'une fuite d'hydrocarbures. Il y a cependant deux facteurs importants à considérer. Tout d'abord, les liquides peuvent se déplacer très lentement sous terre, ou même stagner, à moins que le niveau de la nappe phréatique monte. Il peut donc s'écouler un temps considérable entre le moment où une fuite se produit et l'apparition d'un liquide ou d'une vapeur. En tenant compte de ce qui précède, il faut enregistrer chronologiquement, dans un rapport d'enquête, toutes les sources réelles ou potentielles qui sont découvertes, quel que soit le moment où la fuite s'est produite. Il ne faut éliminer aucune source possible sous prétexte qu'elle date de longtemps, à moins que l'analyse des données ne le justifie.

La troisième étape consiste à déterminer l'altération du produit sous l'effet des agents atmosphériques, à savoir: la vaporisation de la fraction volatile (oléfines, paraffines); la dissolution de certains constituants (en particulier les aromatiques (benzène, toluène, xylène) dans le cas de l'essence (21)) dans l'eau; la décomposition des hydrocarbures par les bactéries; ainsi que l'oxydation des oléfines sous l'effet de la lumière solaire. L'altération du produit peut rendre son identification difficile, mais elle

TABLEAU 5 SOURCES DE FUITE POSSIBLES

1.	Stations-service d'essence.
2.	Garages ou concessionnaires d'automobiles.
3.	Exploitants de véhicules automobiles (compagnies de taxi, laiteries et garages municipaux) et terminus ferroviaires.
4.	Distributeurs de combustible qui fournissent les stations-service ou les utilisateurs commerciaux.
5.	Distributeurs de mazout.
6.	Entrepreneurs, vendeurs d'équipements pouvant stocker des combustibles sur place.
7.	Entreprises de produits chimiques (y compris les raffineries).
8.	Aéroports et marinas.
9.	Usines pouvant utiliser ou stocker des liquides inflammables ou combustibles.
10.	Canalisations de pétrole ou de gaz sous pression élevée dans la région.
11.	Tout autre lieu où des liquides inflammables ou combustibles peuvent être stockés (y compris les emplacements de stockage abandonnés, les habitations privées, les locaux gouvernementaux).

peut aussi fournir des informations sur la durée de séjour dans le sol d'un produit connu et la direction de la migration (22).

Afin de simplifier l'enquête, certaines questions essentielles devraient être posées aux propriétaires ou utilisateurs des réservoirs (tableau 6). Si l'enquête ne révèle aucune source éventuelle, le propriétaire ou les utilisateurs peuvent participer à la vérification de l'équipement et du secteur avoisinant. S'ils ne collaborent pas à l'enquête, il est possible de faire appel aux autorités gouvernementales ou municipales.

Lors de l'examen d'installations et d'équipements, il faut chercher certains indices. Un sol saturé ou noir, du béton taché ou désintégré sont autant d'indices de déversements répétés. Les réservoirs de surface, les conduites de remplissage, les conduites non enfouies, l'équipement de pompage, les rigoles d'écoulement et les puisards doivent être vérifiés en vue de déceler tout indice pouvant révéler une fuite ou un déversement. Pour avoir la certitude qu'un réservoir souterrain fuit, le seul moyen consiste à vérifier le réservoir ou à le déterrer. Si la présence de contaminants peut être reliée à un endroit où se trouvent des réservoirs souterrains, il faut examiner ces réservoirs. Parmi les indices visibles sur le sol et dans le voisinage, citons les reflets irisés sur les cours d'eau et les masses d'eau voisins, la dégradation de la végétation, les vapeurs

TABLEAU 6 QUESTIONS À POSER AUX PROPRIÉTAIRES OU EXPLOITANTS DES RÉSERVOIRS

- Y a-t-il eu des déversements pendant le chargement ou le déchargement?
- Est-ce que l'équipement de stockage ou de manutention fuit, ou y a-t-il eu une fuite? (Voir si des excavations ont pu endommager les installations souterraines ou si des travaux ont été faits à proximité.)
- Des travaux d'entretien ont-ils provoqué la fuite de produits hors des réservoirs, des conduites ou d'autre équipement?
- Y a-t-il eu dégagements d'odeurs ou perte de liquides là où il n'y aurait pas dû y en avoir?
- L'inventaire des réserves a-t-il été tenu?
- A-t-on trouvé de l'eau dans les réservoirs souterrains?
- A-t-on connaissance d'incidents dans la région qui puissent avoir provoqué la fuite de produits de camions-citernes, fûts, grands réservoirs à combustible? (Des autorités locales, comme par exemple les pompiers, pourraient apporter leur aide dans un tel cas.)
- Y a-t-il eu des problèmes de pompage?

dans les égouts et autres cavités souterraines, et le suintement de produits dans les excavations. Si une fuite est détectée, le propriétaire du réservoir devrait immédiatement vider son réservoir et cesser de l'utiliser.

Bien souvent, la source de la fuite n'est pas très évidente, mais des études hydrogéologiques et des mesures de conductance peuvent permettre d'en déterminer l'emplacement. Ces méthodes permettent aussi de connaître l'étendue des dégâts. Il faut d'abord se procurer une carte géologique de la région (le moyen le plus facile et le plus économique consiste à s'adresser à la Commission géologique du Canada). On peut alors procéder à une étude hydrogéologique en forant une série de trous dans la zone entourant le panache jusqu'à ce que l'on puisse détecter l'étendue et l'emplacement du déversement. Une carte géologique permet de déterminer l'emplacement des forages en indiquant aux intervenants les zones de suintement d'hydrocarbures les plus probables. Il ne faut pas oublier, cependant, que les fluides peuvent se diriger vers le haut lorsqu'ils circulent sous terre, et qu'ils peuvent adopter un cheminement extrêmement tortueux lorsqu'ils se déplacent à travers des roches fracturées. Par exemple, il est possible de voir un fluide se déplacer dans une direction puis revenir en direction opposée en suivant des lignes de fracture différentes dans la roche. Dans les zones urbaines, les études hydrogéologiques

sont soumises à des restrictions importantes, en particulier l'interdiction d'accès à des zones où sont situés des édifices ou autres structures fixes, des contraintes de mobilité de l'équipement en raison de la présence de structures fixes, des contraintes relatives à l'emplacement des trous ou tranchées d'essai, ainsi que des risques que courent les équipements de forage et de creusage des tranchées en raison des installations de surface ou souterraines (par exemple, les lignes ou canalisations souterraines des services publics). De plus, les dommages causés aux surfaces goudronnées, à la végétation, aux palissades ou murs de retenue, la perturbation de la circulation automobile et l'augmentation du bruit augmentent le coût de l'enquête et(ou) présentent des inconvénients pour le public.

Le choix de l'équipement de forage à utiliser dans le cas d'une étude hydrogéologique dans une zone urbaine dépend du type de sol à forer, de la profondeur des trous et de la facilité de manoeuvre. Les principaux types d'équipements et méthodes disponibles sont indiqués au tableau 7 (23, 24). Le mouvement en tire-bouchon des tarières perturbe fortement les échantillons, et les déblais sont considérablement mélangés pendant leur remontée jusqu'à la surface. Les déblais de forage rotatif ne sont généralement pas mélangés et ils sont donc davantage représentatifs du forage en cours. En zone urbaine, il peut être également difficile de manoeuvrer l'équipement. Après que les trous ont été forés, ils peuvent servir à l'échantillonnage de l'eau souterraine. Certains échantillonneurs et dispositifs de mesure disponibles sur le marché sont présentés au tableau 8.

Des mesures de conductivité du terrain peuvent servir à cartographier la contamination du sous-sol. L'instrument utilisé fait la distinction entre les polluants souterrains, le sol et l'eau souterraine, grâce à leurs propriétés diélectriques différentes. Il n'est pas nécessaire qu'il soit en contact avec le sol, et le nombre de forages ou de puits témoins nécessaires peut être moindre. On peut utiliser des instruments portables par une personne, qui permettent de forer jusqu'à une profondeur de 6 m; les instruments plus gros, nécessitant l'intervention de deux personnes, permettent de forer jusqu'à 60 m. Les mesures de conductivité permettent non seulement de détecter la présence d'hydrocarbures mais aussi d'évaluer l'épaisseur des nappes d'hydrocarbures flottantes. Là encore, cette méthode est très limitée dans les zones urbaines, du fait que des éléments comme les canalisations d'égouts, les conduites d'eau et les lignes électriques ainsi que les objets en surface peuvent fausser les mesures de conductivité, en augmentant généralement les valeurs obtenues. Ces interférences peuvent être éliminées en modifiant l'orientation du dispositif de mesure et(ou) en considérant l'objet enterré ou en surface comme une "constante". Lorsque ces mesures de conductivité du terrain entrent dans le cadre d'un programme hydrologique, elles peuvent améliorer la précision de l'étude des déversements

TABLEAU 7 MÉTHODES ET ÉQUIPEMENT DE FORAGE

Type/méthode de forage	Diamètre du trou (cm)	Profondeur maximale du trou (m)	Durée moyenne par trou	Coût	Avantages	Inconvénients
Tarière à tige pleine	10 à 51	9 à 15	Rapide (dans des conditions de sol appropriées)	Peu coûteux à modéré	- Facile à obtenir - Mobile - Permet d'obtenir des échantillons de sol sec pendant le forage	- Éboulement dans les sols inappropriés - Bon seulement dans les sols non consolidés à grains fins - Les forages d'essai ne peuvent servir à la récupération
Tarière à tige creuse	10 à 51	9 à 15	Rapide (dans des conditions de sol appropriées)	Peu coûteux à modéré	- Convient aux sols sableux - On peut mettre en place le tubage par la tige creuse - Permet d'obtenir des échantillons en sol sec et par cuillère fendue - Empêche les éboulements	- Diamètre extérieur du tubage limité à 5 à 8 cm - Convient seulement aux sols non consolidés à grains fins - Les forages d'essai ne peuvent servir à la récupération
Tarière à tige pleine, carrée	20 à 122	27	Rapide	Modéré à coûteux	- Permet de forer des trous de grand diamètre - Forage avec un minimum de bouleversement ou contamination du sol - Permet d'obtenir de bons échantillons de sol	- Équipements importants rarement disponibles en zones rurales - Tubage éventuellement nécessaire pendant le forage
Équipement de forage à benne preneuse	30 à 183	27	Rapide	Modéré à coûteux	- Permet d'obtenir de bons échantillons de sol - Permet de forer des trous de grand diamètre	- Contrôle des effondrements difficile - Utilisation de fluide de forage occasionnellement nécessaire - Grande surface de travail généralement nécessaire
Foreuse rotative	10 à 15	Sans limite	Rapide	Coûteux	- Bon pour trous profonds - Peut être utilisé dans les sols consolidés et dans de la roche relativement tendre - Très facile à obtenir - Empêche les effondrements	- Fluide de forage nécessaire (possibilité d'endommagement du trou) - Eau de forage nécessaire

TABLEAU 7 (suite)

Type/méthode de forage	Diamètre du trou (cm)	Profondeur maximale du trou (m)	Durée moyenne par trou	Coût	Avantages	Inconvénients
Outillage de forage au câble	10 à 41	Sans limite	Lent	Modéré à coûteux	- Permet d'obtenir de bons échantillons de sol - Permet de forer des trous de grand diamètre	- Plus lent que d'autres méthodes - Trou souvent non rectiligne - Tubage parfois nécessaire pendant le forage
Marteau pneumatique	10 à 30	Sans limite	Rapide	Coûteux	- Pénétration rapide dans la roche non consolidée	- Inefficace dans le sol consolidé - Bruyant - Éjection de poussière et d'air - Une entrée d'eau excessive limitera son utilisation
Enfoncement de tubage (pointe crépinée)	5 à 61	18	Lent à modéré	Peu coûteux	- Portatif - Facile à obtenir	- Usage limité aux sols non consolidés; ne peut pénétrer dans les gros blocs rocheux ou la roche en place - Difficulté pour obtenir des échantillons de sol - Les forages d'essai ne peuvent généralement servir à la récupération
Forage sous pression hydraulique*	5 à 61	30	Lent à modéré	Modéré	- Facile à obtenir	- Limité aux sols non consolidés - Difficulté pour obtenir des échantillons de sol - Les forages d'essai ne peuvent servir à la récupération
Puit creusé à la main	Sans limite	3 à 6	Rapide	Non coûteux	- Facile à obtenir - Forage facile de trous de grand diamètre	- Les éboulements peuvent être un problème sérieux - Profondeur limitée - Danger d'explosion en cas de forage dans des sols imprégnés d'hydrocarbures

* Un boyau résistant aux pressions élevées est fixé à un tube qui pénètre dans le sol sous l'action d'un jet d'eau.

TABLEAU 8 DISPOSITIFS DE MESURE DE L'EAU SOUTERRAINE

Dispositif	Description	Remarques
Échantillonneurs de surface (Oil Recovery Systems Inc.)	- Tube en acrylique ou téflon scellé avec clapets de retenue à billes (Delrin pour le type en acrylique, téflon pour le type au téflon) - Comprend un cordon de descente résistant à la moisissure, antistatique, de 7,6 m - Le type acrylique est clair et étalonné en pouces et en centimètres	- Mesurent des profondeurs jusqu'à 30 m avec un ruban à rouleau Coûts: 30 cm* Échantillonneur en acrylique 75,00 $** 102 cm Échantillonneur en acrylique 95,00 $ 40 cm double extrémité Échantillonneur en acrylique 98,00 $ 30 cm téflon Échantillonneur en acrylique 85,00 $ 61 cm téflon Échantillonneur en acrylique 115,00 $ 91 cm téflon Échantillonneur en acrylique 145,00 $ Coffret de transport en PVC 9,95 $ Rouleau à ruban - 15 m 59,50 $ - 30 m 65,60 $
Sonde à interface (Oil Recovery Systems Inc.)	- Détermine les niveaux d'eau et peut déterminer l'interface pétrole-eau - Comprend une sonde à double captage, un capteur optique de liquide; permet la distinction entre les hydrocarbures et l'eau par étude de la conductivité électrique - Fonctionne sur piles	- Rubans de 15 m, 23 m, 30 m disponibles - Dimensions des sondes: 15 cm, 23 cm, 30 cm de longueur et 1,5 cm de diamètre
Échantillonneur Well Point (K-V Associates Inc.)	- Série de tubes en acier inoxydable de 1,6 cm - Enfoncé dans le sol; l'échantillon est prélevé avec une pompe aspirante	- Non électronique - Fonctionne entre 3 et 7 m de profondeur - Coût: 950 $
Échantillonneurs de liquide NEPCCO	- Échantillonneurs en acrylique et en téflon disponibles; semblables aux échantillonneurs pour récupération du pétrole - Disponibles en toute longueur sur demande, comprend un cordon de descente de 11 m, ne faisant pas d'étincelle	Coûts: 36 cm Échantillonneur en acrylique 69,00 $ 56 cm Échantillonneur en acrylique 82,00 $ 107 cm Échantillonneur en acrylique 89,00 $ Téflon, 61 cm de longueur et 2,5 cm de diamètre extérieur 149,00 $ Téflon, 61 cm de longueur et 4,4 cm de diamètre extérieur 269,00 $ Coffret de transport en PVC 4,25 $
Sondes NEPCCO Hydropurge et Petropurge	- Sonde Petropurge pour évaluation de l'épaisseur des nappes d'hydrocarbures liquides (pétrole, gaz, solvants) - Sonde Hydropurge pour capter l'interface hydrocarbures-eau	
Dispositif Bat Groundwater	- Comprend un bout filtre fixé à une rallonge tubulaire de 2,5 cm de diamètre en acier ou en plastique - Divers adaptateurs d'essai permettent une connexion rigide temporaire avec le bout filtre à l'aide d'une seringue hypodermique - Les échantillons sont pris en abaissant l'adaptateur dans le tube de connexion, en poussant l'aiguille dans un disque de caoutchouc situé dans le bout filtre. Le liquide est aspiré dans le conteneur à travers le bout filtre sous l'effet de la différence de pression - Le bout filtre ne sert qu'une fois	- Aucun contact avec l'air ni contamination externe - Les composants volatils peuvent être échantillonnés avec précision - Mise en place: - L'enfoncer dans les sols mous - Utiliser des forets à tige creuse pour les sols durs - Forer, remplir de sable, sceller avec de la bentonite dans le cas des roches solides - Profondeur d'utilisation: 0,5 à 60 m (max. connu 400 m) - Aucun contact humain avec le sol ou les fluides Coûts: Bout filtre (STD) 268,00 $ Trousse d'échantillonnage de base (30 bouts filtres) 2000,00 $ Trousse de carottage sous pression 6350,00 $ Trousse de mesure de perméabilité 2670,00 $

* Se rapporte à la longueur de l'échantillonneur.
** Prix en dollars américains sauf avis contraire.

et permettent de réduire les coûts globaux du fait que le nombre de puits de contrôle et de puits témoins nécessaires est moindre (25).

4.2 Mesures à long terme

Après avoir décelé la source d'une fuite et son importance et avoir pris les précautions nécessaires, on peut procéder au nettoyage et à la récupération. Étant donné que la migration et la récupération dépendent d'un grand nombre de facteurs, il n'existe pas de système universel. Souvent, les systèmes de récupération qui font appel à une combinaison d'équipements et de techniques doivent être adaptés à un type de fuite particulier. De plus, ces opérations sont souvent à long terme, c'est-à-dire qu'elles portent sur plusieurs années.

Il est possible de faciliter les opérations de récupération en tenant compte, au préalable, de certains facteurs (tableau 9). La section suivante décrit certaines des méthodes et certains des équipements que l'on peut généralement utiliser pour récupérer et traiter les contaminants souterrains. En outre, il est fortement recommandé de consulter un spécialiste avant d'entreprendre un programme de récupération, étant donné que s'il est appliqué de façon inappropriée, il peut non seulement être inefficace mais aggraver la situation.

4.2.1 Récupération de l'eau souterraine. - Dans la majorité des cas de fuites de réservoir, le produit atteint l'eau souterraine, soit par suintement, soit par entraînement (généralement par l'eau de pluie) dans le sol. Les hydrocarbures suivent alors l'écoulement des eaux souterraines et contaminent une zone plus étendue. Pour récupérer les hydrocarbures, il faut les intercepter et arrêter leur écoulement, soit en captant les hydrocarbures qui se logent dans les cavités formées à la surface de la nappe phréatique, soit en pompant l'eau souterraine. Cette dernière méthode crée un cône de dépression (figure 1). Tout hydrocarbure libre dans le cône de dépression se déplace sous l'effet des forces de gravité vers le fond du cône où la couche qu'il forme s'épaissit et peut être récupérée. Cette méthode ne donne de bons résultats que s'il est possible de maintenir le gradient de pression artificiel à la surface de l'eau souterraine.

Le choix de la méthode de récupération dépend de divers facteurs:

- la quantité et le type d'hydrocarbures dans le sol;
- l'étendue de l'étalement des hydrocarbures à la surface de la nappe phréatique;
- la nature des couches d'hydrocarbures dans la zone de l'écoulement;
- la position de la nappe phréatique;
- la nature du sol et des formations rocheuses dans la zone;

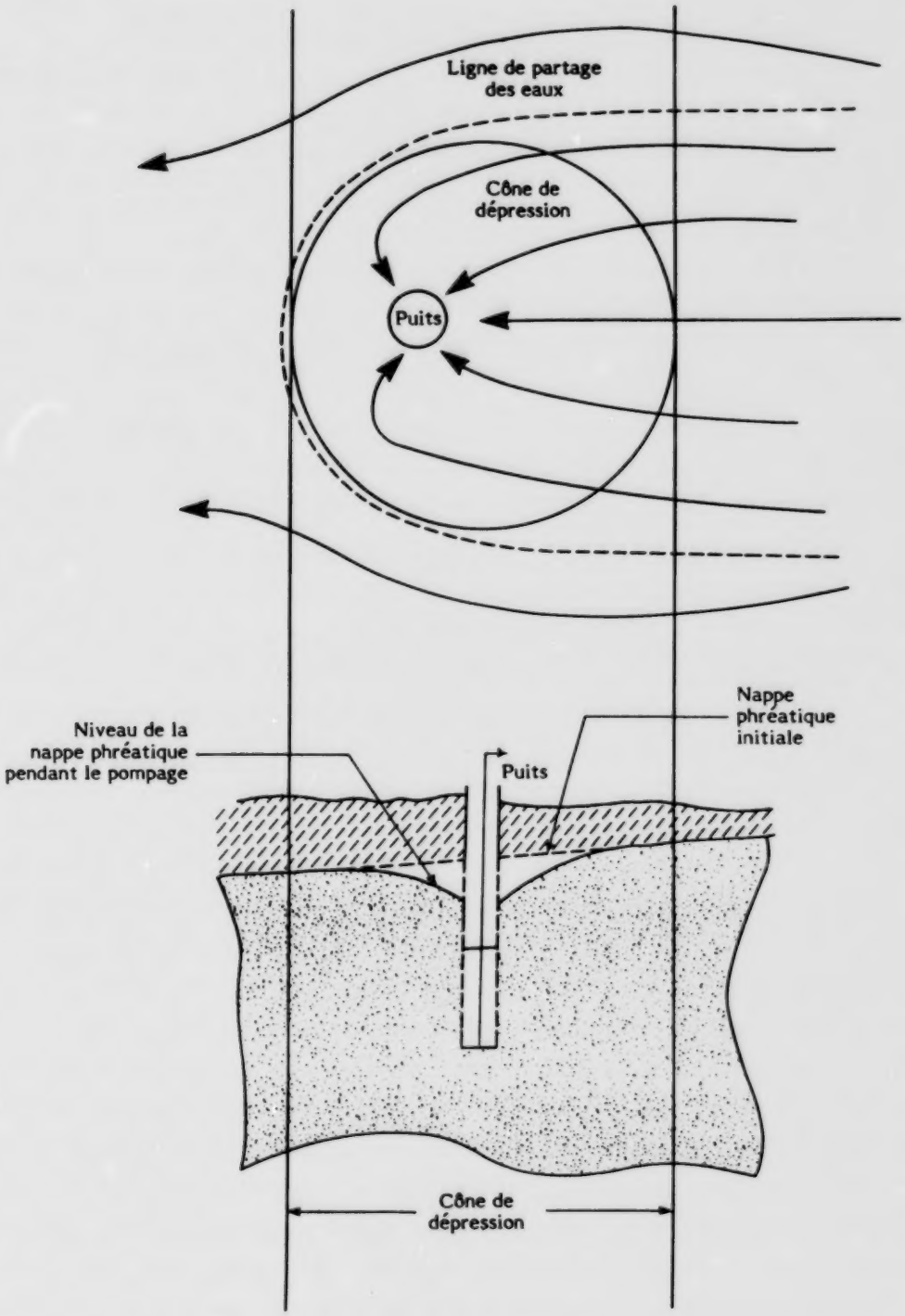


FIGURE 1 CÔNE DE DÉPRESSION FORMÉ PAR POMPAGE (23)

TABLEAU 9 COMMENT ÉVITER LES PROBLÈMES COURANTS AU COURS DE L'APPLICATION DE MESURES CORRECTIVES

Considérer que:

- Un produit mobile cherche une voie de sortie, que ce soit des canalisations d'égouts, des canalisations souterraines de services publics ou des cavités, des terrains de drainage ou des sous-sols, pendant son cheminement vers la nappe phréatique ou d'autres obstacles naturels.
- La fuite continue à constituer un danger et(ou) une source de pollution de l'environnement tant qu'elle n'est pas colmatée.
- Les puits d'essai pratiqués dans la nappe phréatique doivent être suffisamment profonds pour qu'il soit possible de déterminer la nature du produit et le niveau de l'eau.
- Une crépine à l'intérieur du puits ou un tuyau convenablement perforé permet de mesurer avec précision l'épaisseur du produit sur la nappe phréatique.
- L'emploi de gravier de remblayage pendant la mise en place des puits de récupération ou d'essai en assure l'efficacité.
- Avant de mettre en place un puits de récupération, il faut juger si l'assèchement à l'aide d'un cône de dépression risque de contaminer d'autres zones ou s'il risque d'entraîner des problèmes dans des édifices voisins.
- Il faut obtenir les approbations nécessaires pour rejeter les eaux usées pompées dans les puits de récupération.
- Les puits de récupération qui confinent et récupèrent le produit sont plus efficaces.
- L'équipement utilisé doit être approprié au projet de récupération, sinon les coûts seront plus élevés ou il y aura des pertes de temps excessives.

- l'accès aux puits ou tranchées de récupération à des fins d'entretien;
- l'aspect économique.

L'opération optimale est celle qui permet de récupérer la plus grande quantité possible d'hydrocarbures tout en faisant baisser au minimum le niveau de la nappe phréatique. Ce facteur est important, étant donné que les hydrocarbures libres se déplaceront dans un sol qui, avant l'opération de pompage, était saturé d'eau et, par conséquent, non contaminé. Le débit de pompage total nécessaire pour créer le cône dépend des caractéristiques de l'aquifère, et peut être calculé d'après des essais de pompage. Lorsque le débit de pompage nécessaire est trop élevé pour un seul puits, il faut mettre en service plusieurs puits en série. Si l'on utilise plusieurs puits pénétrant partiellement la nappe phréatique plutôt qu'un seul puits, la récupération d'hydrocarbures est plus rapide pendant les étapes initiales et la contamination du sol est limitée au minimum, au fur et à mesure que le niveau de la nappe phréatique baisse (26).

Tranchées et fossés. - Les tranchées et fossés sont un moyen efficace pour intercepter une fuite; mais cette méthode n'est pratique que lorsque la nappe phréatique n'est pas à plus de 3 m de profondeur environ. Cette limite est fonction de l'équipement disponible de creusage des tranchées, du soutien naturel des parois du fossé sans que se produise un éboulement et de la quantité de sol à enlever. Signalons que les parois de fossés creusés dans des sols non consolidés doivent avoir une légère pente et il faut donc ôter une quantité de terre excessive par rapport à la profondeur du fossé. Un soutènement du sol comme un coffrage ne peut que nuire à l'écoulement des hydrocarbures s'il est installé horizontalement plutôt que verticalement dans le fossé.

Il faut construire une tranchée d'interception, face au front de la masse d'hydrocarbures en migration, et aussi près d'elle que possible, sans endommager les soubassements ou les fondations de tout édifice dans lequel le produit a pénétré (figure 2). Le fossé doit avoir une largeur suffisante pour y placer les pompes et les dispositifs de récupération des hydrocarbures. Bien que cela ne soit pas généralement nécessaire, on peut installer une garniture imperméable sur la paroi aval afin d'empêcher l'écoulement des hydrocarbures, tout en laissant passer l'eau. En pratique, l'égalisation de la pression hydrostatique des deux côtés de la feuille de garniture tend à la faire flotter et à l'éloigner de la paroi, et les hydrocarbures peuvent alors contourner l'extrémité du revêtement. En outre, le retrait continu de l'eau et des hydrocarbures dans la tranchée provoque une dépression de l'eau souterraine des deux côtés, ce qui empêche toute nouvelle migration. Même si l'eau n'est pas enlevée, la récupération continue des hydrocarbures suffit généralement à les empêcher de pénétrer plus avant dans le sol, étant donné que le niveau de la frange capillaire limitrophe (terre saturée d'eau) fait fonction d'écran pour les hydrocarbures (23).

À moins que le système de récupération des hydrocarbures exige que la tranchée soit ouverte, on place une série de tuyaux perforés au fond de la tranchée et on la remplit de concassé ou de gravier. Des puisards sont disposés tout le long de la tranchée pour récupérer les hydrocarbures et l'eau (figure 3).

Il existe deux types principaux de systèmes de récupération en tranchée. Le premier consiste en une tranchée ouverte dans laquelle on place un dispositif écrémeur pour récupérer les hydrocarbures. Il permet d'éliminer la quasi-totalité de l'eau, mais la récupération est très lente car le déplacement des hydrocarbures vers la tranchée dépend des gradients naturels. Le second type comporte une pompe pour enlever le produit de la tranchée, qui peut être remblayée ou non. Ce système est plus efficace et la récupération est plus rapide, étant donné que l'on crée un gradient d'écoulement vers la tranchée.

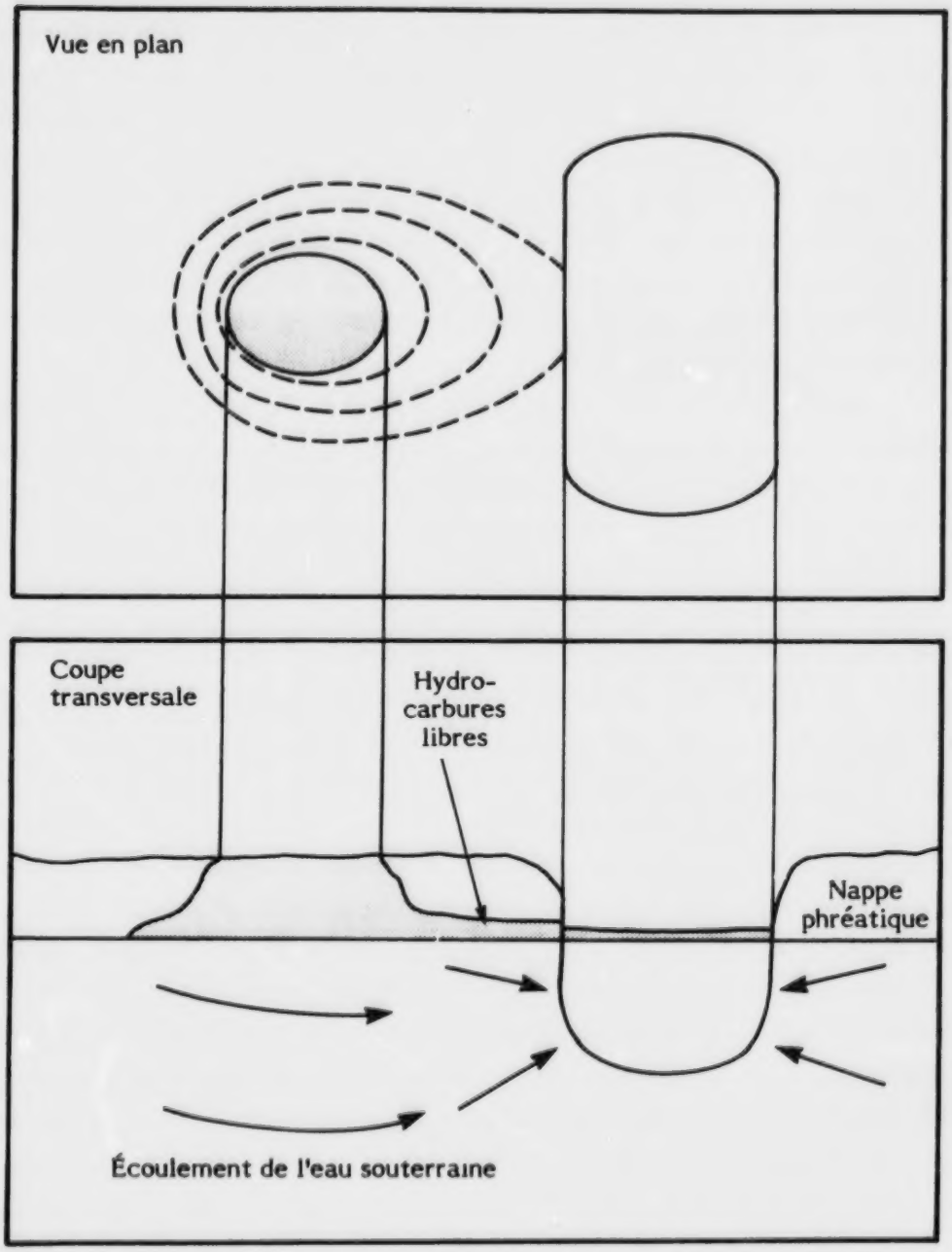


FIGURE 2 INTERCEPTION DE L'ÉCOULEMENT PAR UNE TRANCHÉE CONSTRUITE EN TRAVERS DU CHEMINEMENT DE MIGRATION (23)

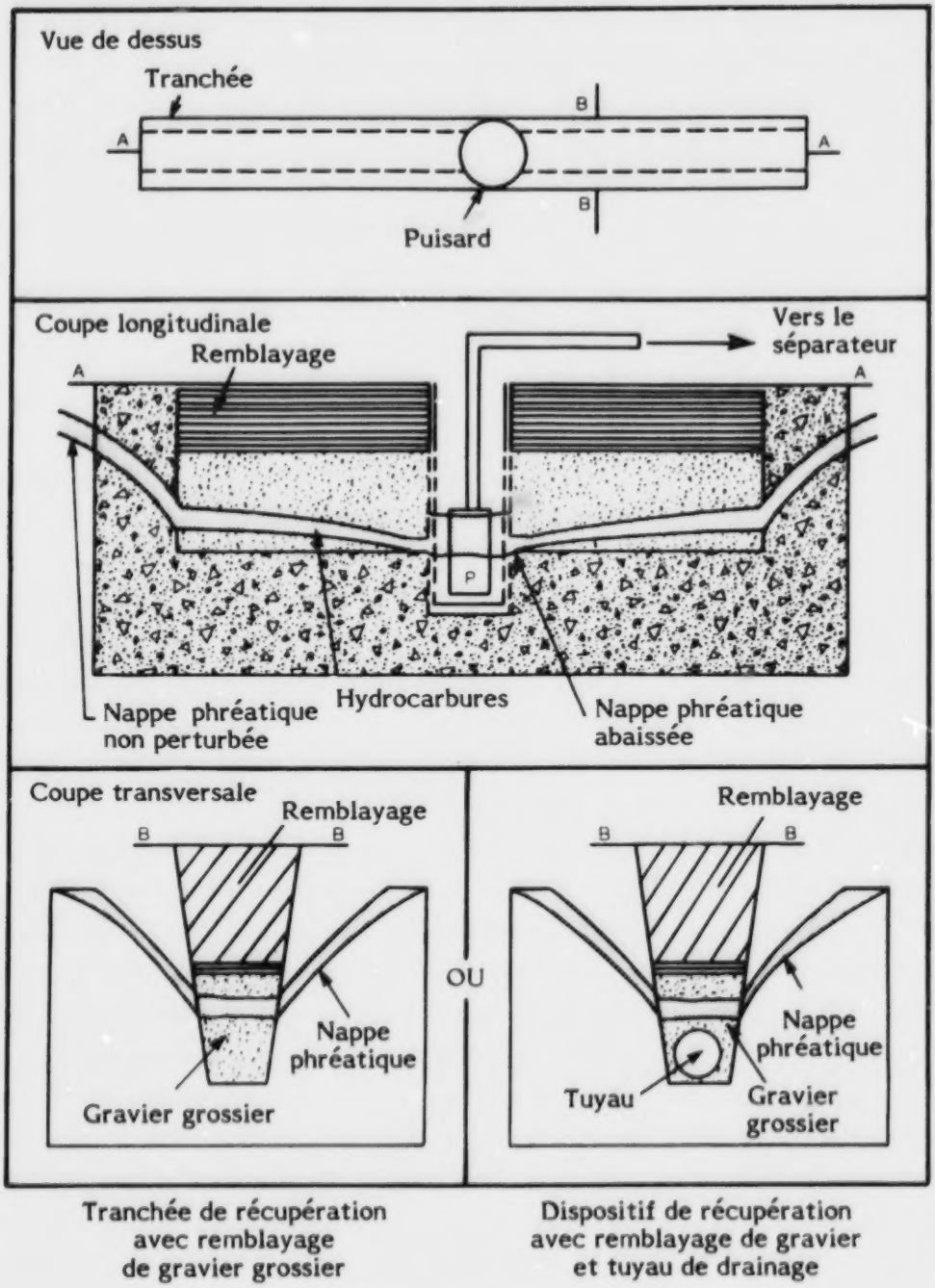


FIGURE 3 TRANCHÉE DE RÉCUPÉRATION AVEC PUISARD (23)

L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut éliminer de plus grands volumes d'eau pouvant avoir des teneurs inacceptables d'hydrocarbures dissous (22).

La méthode de récupération en tranchée offre plusieurs avantages. On peut généralement trouver sur place les matériaux et l'équipement nécessaires à la mise en place du système. C'est une méthode simple et l'installation se fait assez rapidement. Cependant, la tranchée doit traverser le déversement dans toute sa largeur, ce qui ne permet d'appliquer cette technique qu'aux déversements dont l'étendue est limitée. En outre, la tranchée ne peut dépasser une certaine profondeur, et tout dispositif d'écrémage ou équipement de pompage doit fonctionner en continu, sinon les hydrocarbures s'accumulent et contournent les extrémités de la tranchée (22).

Puits. - Des puits d'inspection ou d'essai peuvent servir à déterminer l'étendue de la zone contaminée et servir ensuite de points de récupération. Les puits forés au jet ou à production forcée font de bons points d'essai, mais leurs dimensions limitent leur utilisation pour la récupération de l'eau contaminée ou des hydrocarbures.

Quelques techniques de forage de puits sont présentées au tableau 7. Le choix du type de technique est déterminé par le diamètre du puits, sa profondeur et son emplacement. Bien que l'on ait déjà utilisé des puits d'un diamètre égal ou supérieur à 1 m, les plus courants ont un diamètre de 10 à 30 cm. Un puits de grand diamètre permet d'obtenir un taux de récupération du fluide légèrement plus élevé qu'avec un puits de plus petit diamètre; la seule exigence est qu'il soit assez large pour recevoir un dispositif de pompage approprié (23). Une fois le puits foré, il faut installer un tubage afin d'éviter tout éboulement. Tout élément tubulaire d'une rigidité et d'une résistance suffisantes au produit convient. Il faut tenir compte aussi de la facilité de manipulation, de la disponibilité et du coût. La section du tubage à travers laquelle l'eau doit entrer dans le puits doit être perforée ou rainurée et recouverte d'un grillage avant d'être installée. Cette partie du tube, appelée crépine, doit dépasser de 1,5 m au-dessus et au-dessous du niveau normal de l'eau, afin de tenir compte des fluctuations du niveau de l'eau. La dimension et l'emplacement des perforations dépendent des caractéristiques du sol et du tassement du gravier autour du tube. Une crépine formée de fils rainurés offre un pourcentage maximal de surface ouverte, ce qui est souhaitable étant donné que la crépine est facilement encrassée par les bactéries qui se développent, et que plus la surface ouverte est importante, plus longtemps le puits fonctionne sans avoir à être nettoyé et remis en état. L'installation d'un tube convenablement remblayé de gravier minimise l'infiltration de fines particules de sable et le besoin de filtrage supplémentaire. La figure 4 représente une installation convenable de puits d'essai et de récupération (27).

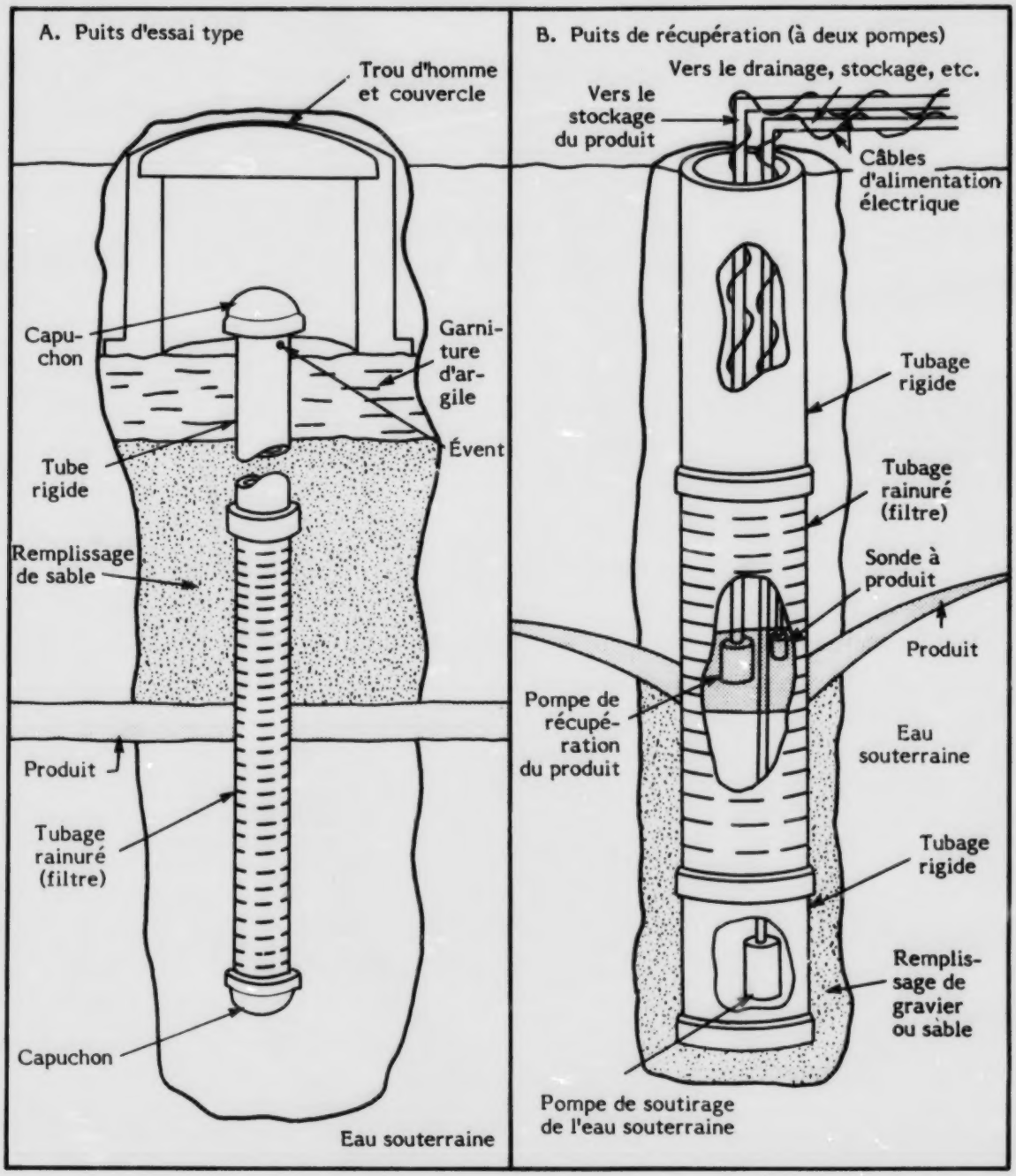


FIGURE 4 CONSTRUCTION D'UN PUITS

L'emplacement des puits est aussi un point important. Un bon espacement entre eux assurera que leurs cônes de dépression se recouvrent partiellement (figure 5). Cet espacement peut être déterminé par la surimpression de la formule de soutirage pour des puits uniques. On ne devrait pas utiliser de puits à l'extérieur de la zone de déversement à moins que les conditions en surface ne l'exigent. Bien que l'on creuse parfois des puits en dehors de cette zone pour emprisonner le produit entre la zone de déversement et le point de décharge naturel de l'eau, une telle technique étend la zone de contamination. Des problèmes peuvent aussi survenir lorsque la couche d'eau souterraine est mince, en particulier lorsqu'une couche supérieure contaminée est séparée d'une couche inférieure non contaminée par un aquiclude (couche de matériaux imperméables comme l'argile). Non seulement le creusage excessif du puits de récupération ne donnera aucun résultat dans ce cas, mais la perforation de l'aquiclude pourrait entraver la récupération des hydrocarbures ou contaminer la couche aquifère inférieure confinée. Enfin, il faut prendre certaines précautions en zones urbaines, étant donné que l'abaissement excessif de la nappe phréatique risque d'affaiblir les propriétés de résistance à la charge des sols et entraîner l'enfoncement des fondations des constructions. Un mécanisme flottant de contrôle du niveau peut être installé dans les puits de façon que les pompes aspirantes ne fonctionnent que dans une gamme limitée de fluctuations du niveau de l'eau souterraine (23).

Il existe divers types de systèmes de récupération par des puits:

a. **Système à pompe unique et puits unique** (figure 6). Dans le cas des puits à pompe unique, les hydrocarbures et l'eau sont extraits ensemble au moyen d'un tuyau unique et sont dirigés vers une installation en surface de stockage ou de traitement. Le débit de la pompe est réglé de façon à extraire l'eau souterraine à un rythme constant. L'un des avantages de ce système est son faible coût. Étant donné qu'on n'a besoin que d'une pompe et que des commandes électroniques compliquées ne sont pas nécessaires pour régler les niveaux de pompage (un dispositif mécanique de flottation unique suffit), ce système est moins coûteux que les autres. En outre, les puits peuvent avoir un diamètre plus petit, ce qui réduit les coûts de forage, des matériaux et d'enlèvement du sol. Enfin, un système de récupération à puits de petit diamètre nécessite moins d'entretien, est moins voyant, et une seule personne suffit pour l'installer et le faire fonctionner.

   Un système à pompe doit cependant comporter en surface des séparateurs, pour que les hydrocarbures ne se mêlent pas à l'eau à la surface du sol. L'agitation de l'eau contaminée, pendant la récupération, peut rendre la séparation difficile et provoquer l'émulsion de la substance, ce qui risque par contrecoup d'augmenter la quantité de composants d'hydrocarbures solubles retenus dans les eaux usées (22). On peut pallier quelque peu cet inconvénient en utilisant des pompes à piston, des pompes à vis d'Archimède et des pompes à diaphragme plutôt que des pompes centrifuges. Il est généralement plus pratique d'utiliser un système à pompe unique avec lequel le débit de récupération d'hydrocarbures-eau est relativement faible (c'est-à-dire 2000 litres/h ou moins), si l'on envisage de n'utiliser le système de

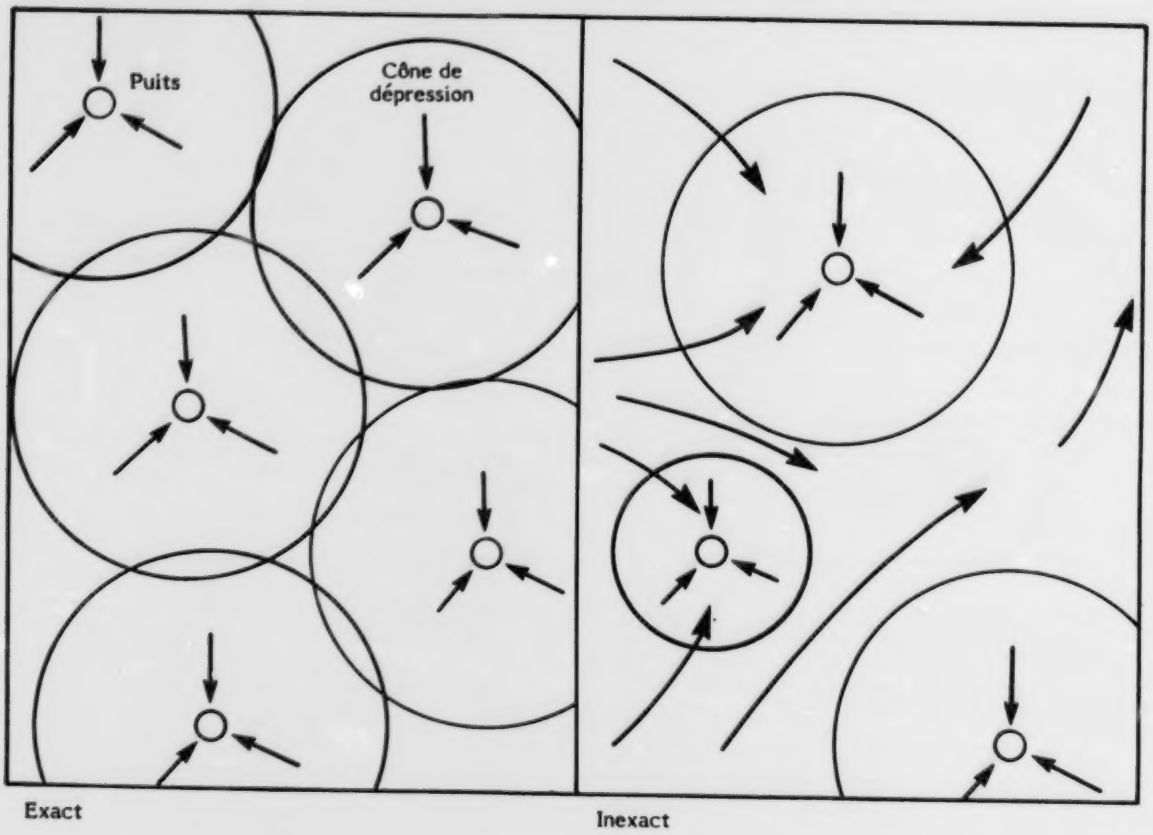


FIGURE 5 ESPACEMENT DES POINTS DE RÉCUPÉRATION EN ZONE CONTAMINÉE (23)

récupération que pendant une période courte ou lorsque l'utilisation d'un système plus compliqué n'est pas justifiée par une analyse coût-bénéfice (23).

b. **Système à pompe unique et puits multiples.** Ce système de récupération présente les mêmes avantages et les mêmes inconvénients que les dispositifs à pompe unique, mais dans les sols à faible perméabilité, cette méthode peut être la seule applicable (22).

c. **Système à deux pompes avec un seul puits** (figure 7). Cet agencement est généralement préférable. Une pompe à eau est placée de façon que sa soupape d'admission soit située près du fond du puits et que l'eau soit soutirée à un débit contrôlé pour qu'un cône de dépression se forme. L'extraction de la substance à récupérer se fait à l'aide d'une pompe suspendue par un câble au-dessus de la pompe à eau et réglée de façon que sa prise soit située au niveau de l'interface hydrocarbures-eau ou juste au-dessous. La pompe de récupération des hydrocarbures est équipée de commandes automatiques qui l'actionnent lorsqu'elle est en contact avec les hydrocarbures et

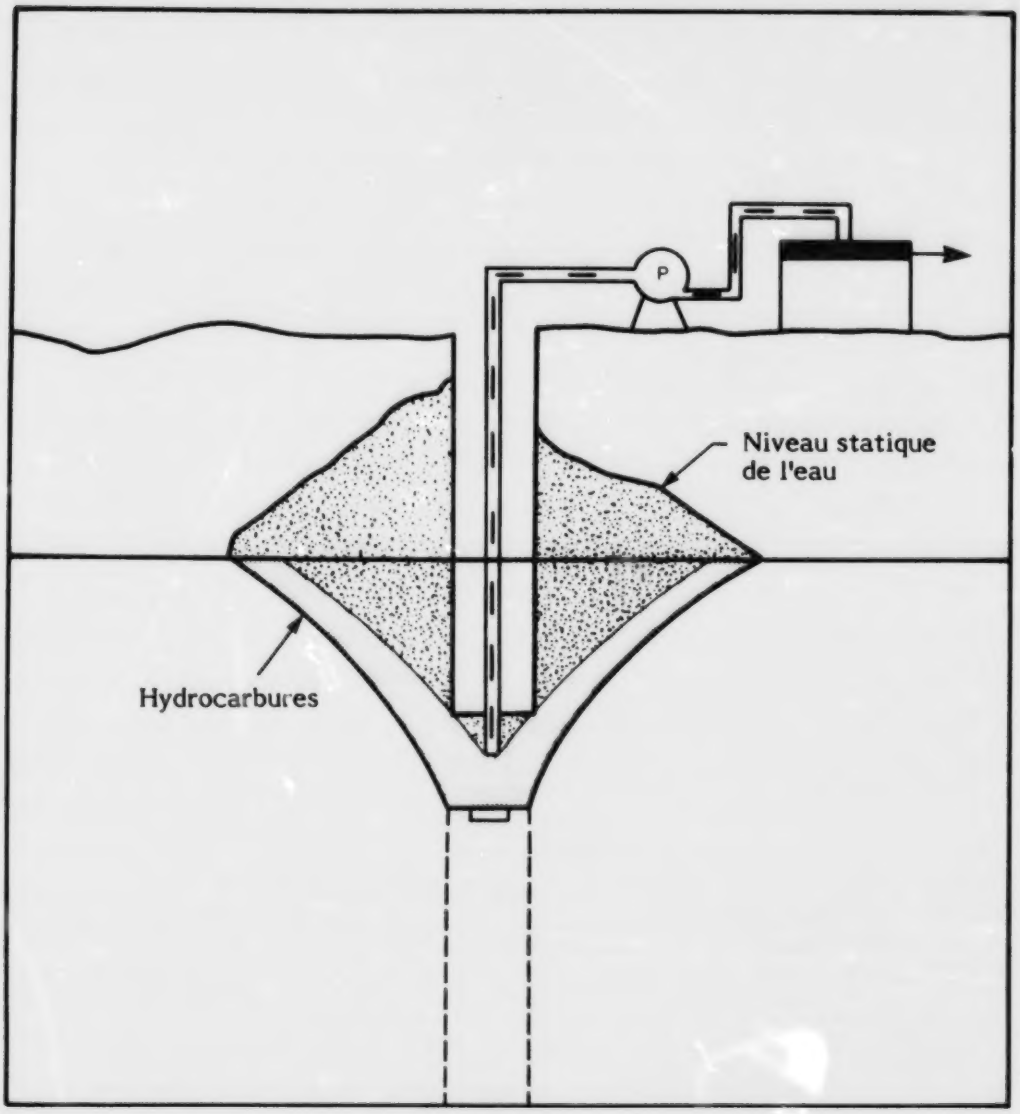


FIGURE 6 SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À POMPE UNIQUE (23)

l'arrêtent s'il entre de l'eau. La pompe à eau est équipée de dispositifs qui interrompent son fonctionnement si les hydrocarbures s'accumulent dans le puits et atteignent sa prise (22).

Cette technique offre plusieurs avantages. Étant donné que les hydrocarbures ne sont pas mêlés à l'eau dans le puits, il est en général inutile d'utiliser des séparateurs en surface. En fait, les hydrocarbures peuvent souvent être récupérés et vendus sans autre raffinage. L'addition de composants solubles à l'eau usée est réduite au minimum; ce système est entièrement automatique et peut fonctionner de façon

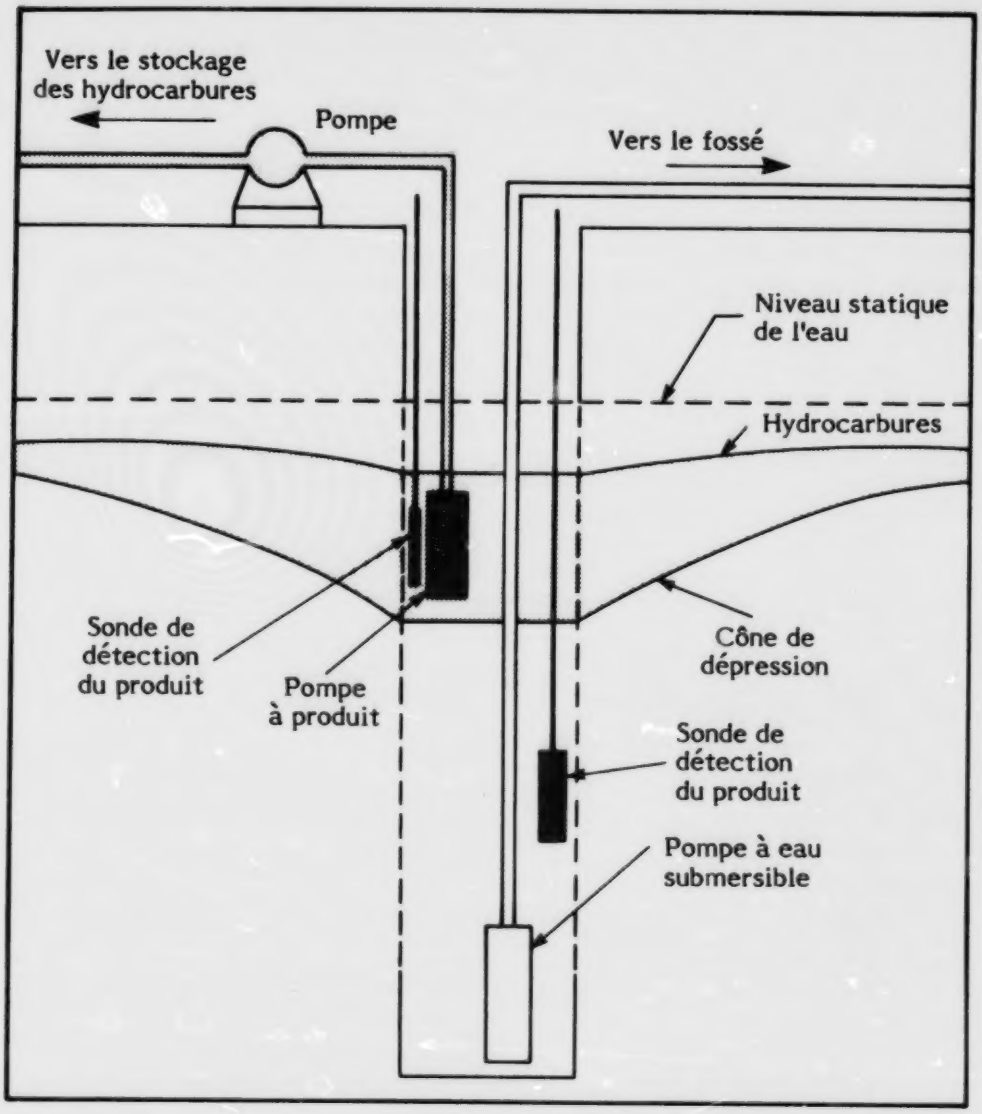


FIGURE 7 SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À DEUX POMPES (22)

continue, ce qui rend la récupération plus efficace et plus rapide. L'un des inconvénients de cette méthode est qu'il faut un tubage et un treillis métallique servant de crépine de plus grand diamètre (25 cm minimum) pour loger les deux pompes. L'équipement est également plus complexe et plus coûteux, et les sondes de résistivité que l'on utilise généralement pour détecter les hydrocarbures dans le puits et faire fonctionner la pompe de récupération nécessitent un entretien et un nettoyage périodiques. Étant donné qu'il est plus compliqué, cet équipement risque de tomber en panne plus souvent ou de mal fonctionner (par exemple, le pompage d'hydrocarbures par la pompe à eau ou l'inverse); les réparations peuvent être

coûteuses et exiger beaucoup de temps. En outre, il faut prendre de grandes précautions lors du réglage et de la mise en route du système de façon à maintenir l'interface hydrocarbures-eau à un niveau constant. Le puits doit donc être vérifié périodiquement pendant les jours qui suivent sa mise en route afin de s'assurer que le niveau de pompage demeure stable. Cependant, lorsque l'on doit récupérer un volume important d'hydrocarbures, le système à double pompe est le plus efficace (22).

d. **Système à deux pompes et deux puits** (figure 8). Ce système peut être utilisé lorsqu'il existe déjà un puits de petit diamètre, mais qu'il ne permet pas d'y installer deux pompes. On peut creuser non loin un second puits de petit diamètre et placer la pompe de récupération des hydrocarbures dans l'aquifère, à un niveau plus élevé que celui choisi dans le puits existant. L'eau soutirée du premier puits (inférieur) créera un cône de dépression, et les hydrocarbures accumulés seront soutirés par l'autre puits. Il faut veiller à ce que les hydrocarbures ne s'accumulent pas dans le puits à eau et, par conséquent, installer des dispositifs de commande automatique qui interrompent le fonctionnement de la pompe à eau dans un tel cas, ou si la pompe à hydrocarbures cesse de fonctionner (22).

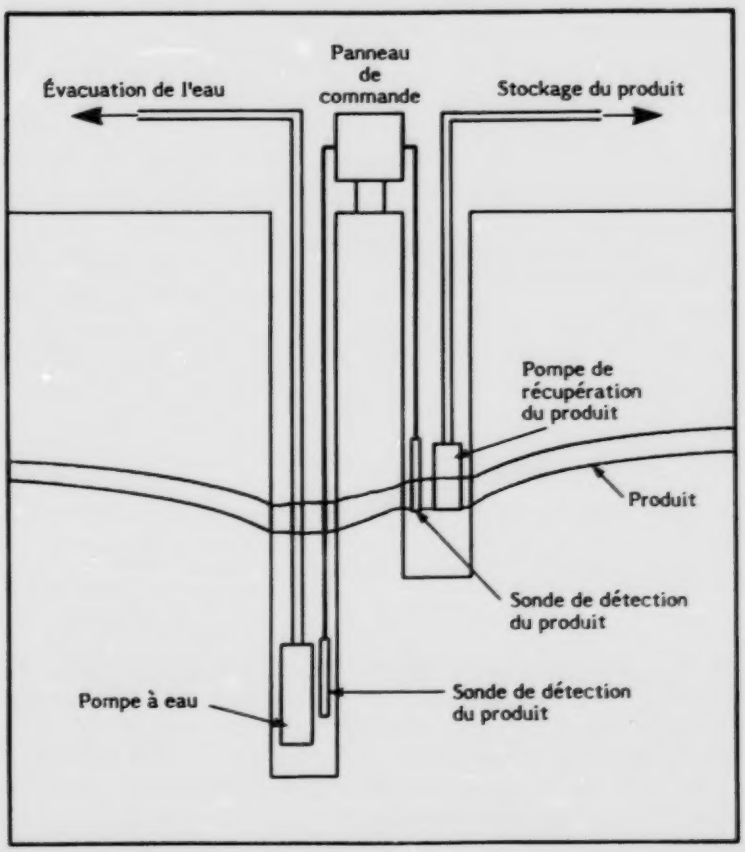


FIGURE 8 SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À DEUX POMPES ET DEUX PUITS (22)

e. **Système à pompe et écrémeur** (figure 9). Ce système permet d'utiliser un des divers types d'écrémeurs selon le diamètre du puits. Les principaux types sont les écrémeurs flottants, les courroies absorbantes et les câbles absorbants. La pompe entraîne la formation d'un cône de dépression tandis que l'écrémeur enlève les hydrocarbures qui flottent à la surface de l'eau dans le puits. Les toiles utilisées comme matériau de courroies ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées régulièrement; l'acier est un matériau beaucoup plus durable. Les hydrocarbures adhèrent à la bande d'acier oléophilique tandis que l'eau est repoussée, ce qui permet de récupérer les hydrocarbures pratiquement sans eau. Ce système peut fonctionner de façon entièrement automatique, de façon intermittente ou continue. Cette méthode convient plus particulièrement à la récupération de petites quantités d'hydrocarbures (23), c'est-à-dire lorsque ceux-ci ne peuvent pas être soutirés efficacement avec une ou deux pompes.

f. **Puits double** (figure 10). Le puits intérieur d'un puits double empêche les hydrocarbures d'être aspirés par la pompe de récupération de l'eau. Ce type de puits peut être moins profond qu'un puits à deux pompes ou à pompe et écrémeur, mais le diamètre du tubage extérieur doit être plus grand. Pour cette raison, ce dispositif

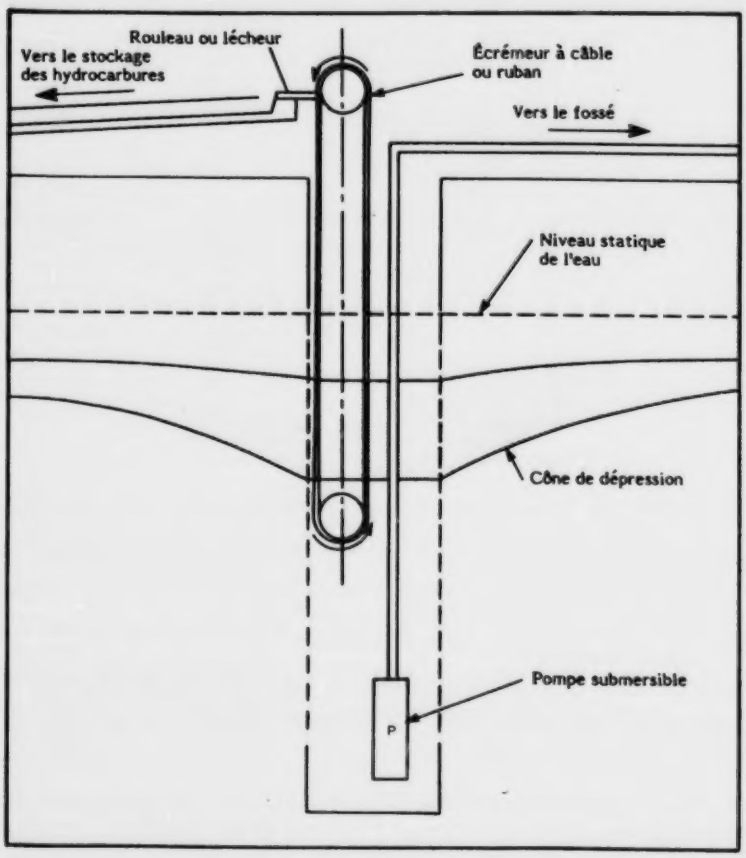


FIGURE 9 SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION À POMPE ET ÉCRÉMEUR (23)

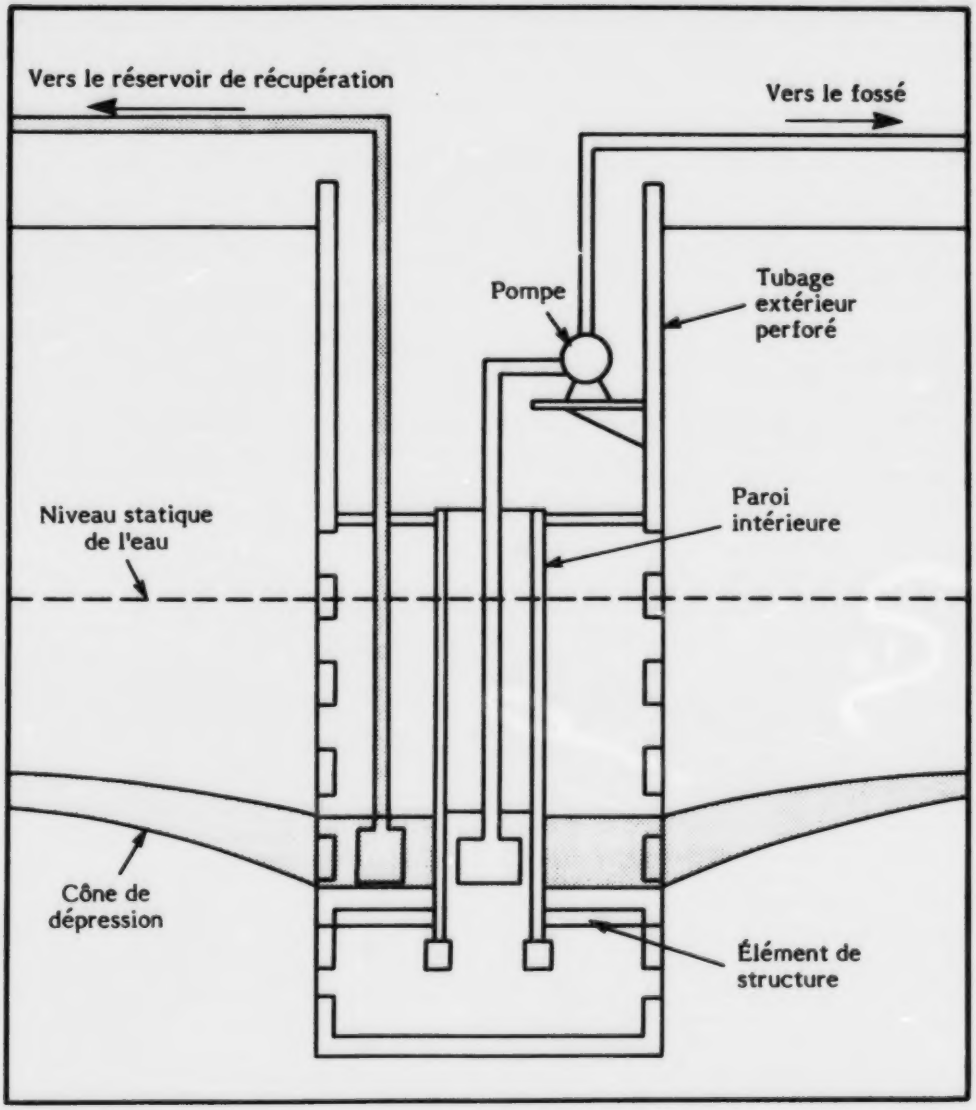


FIGURE 10 PUITS DOUBLE (23)

n'est plus économique lorsque la profondeur du puits dépasse 6 à 8 m. Le fait que le polluant puisse être récupéré par une pompe ou un écrémeur est cependant un avantage (23).

g. **Puits et chambres de récupération** (figure 11). Ce système comporte à la fois un puits de récupération et un second puits équipé d'une chambre de séparation et d'une chambre de récupération. Le puits de récupération est équipé d'une pompe qui alimente le second puits. Cette méthode est cependant coûteuse et ne se justifie que

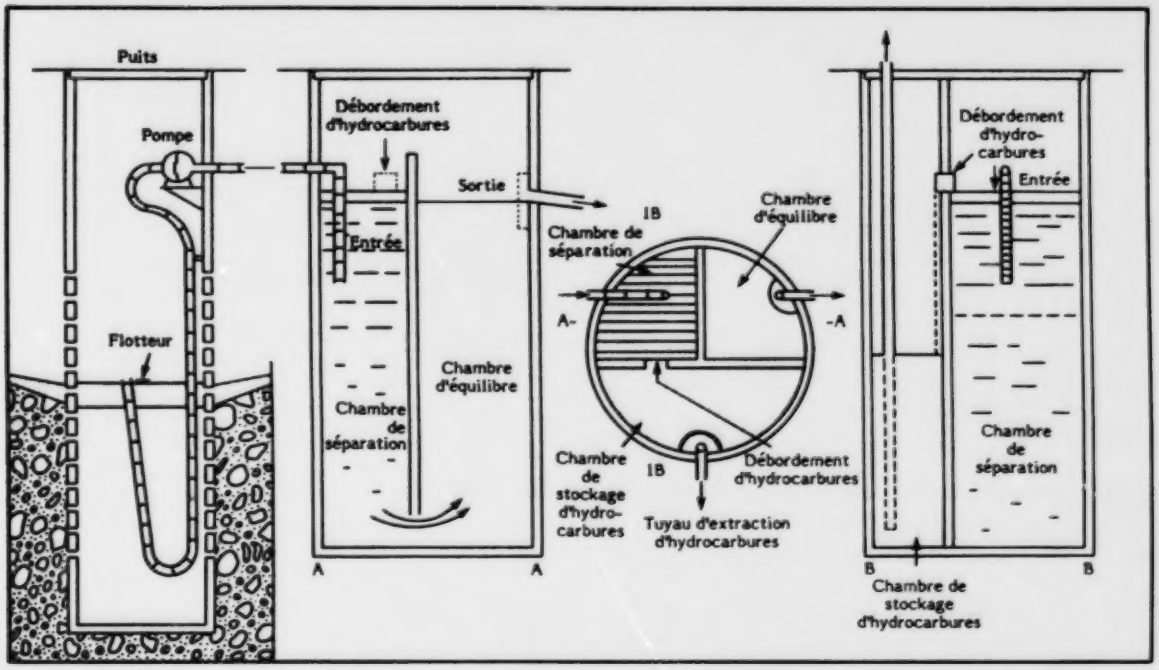


FIGURE 11 COMBINAISON PUITS ET CHAMBRES DE RÉCUPÉRATION (23)

dans le cas d'une récupération à long terme, de la récupération de grandes quantités d'hydrocarbures ou lorsqu'il est souhaitable, pour des raisons d'esthétique, que l'équipement ne soit pas visible (23).

Cuvette de récupération (figure 12). - La cuvette de récupération est utilisée dans les zones où il n'y a que peu ou pas de déplacement de l'eau souterraine ou lorsque l'eau souterraine est retenue par une barrière artificielle et est située à moins de 4 m de la surface du sol. Des cylindres en béton d'un diamètre d'environ 122 cm dont les parois comportent des trous de 6 cm de diamètre, que l'on utilise généralement pour construire des puits secs, sont placés dans le sol juste en aval de la zone la plus contaminée. Le périmètre du puits sec est remblayé avec du gravier (de 2,5 à 5,0 cm de diamètre). La commande à flotteurs de la pompe submersible sert à faire baisser le niveau de l'eau souterraine, tandis qu'une seconde pompe ou un camion-citerne sous vide soustrait les hydrocarbures qui se sont infiltrés dans les cuvettes. Ce système est relativement peu coûteux à installer et il peut être réalisé avec des matériaux faciles à obtenir. Son entretien et son exploitation à long terme sont cependant coûteux, et il faut qu'il soit doté de certaines commandes automatiques pour empêcher la pompe à eau d'aspirer les contaminants.

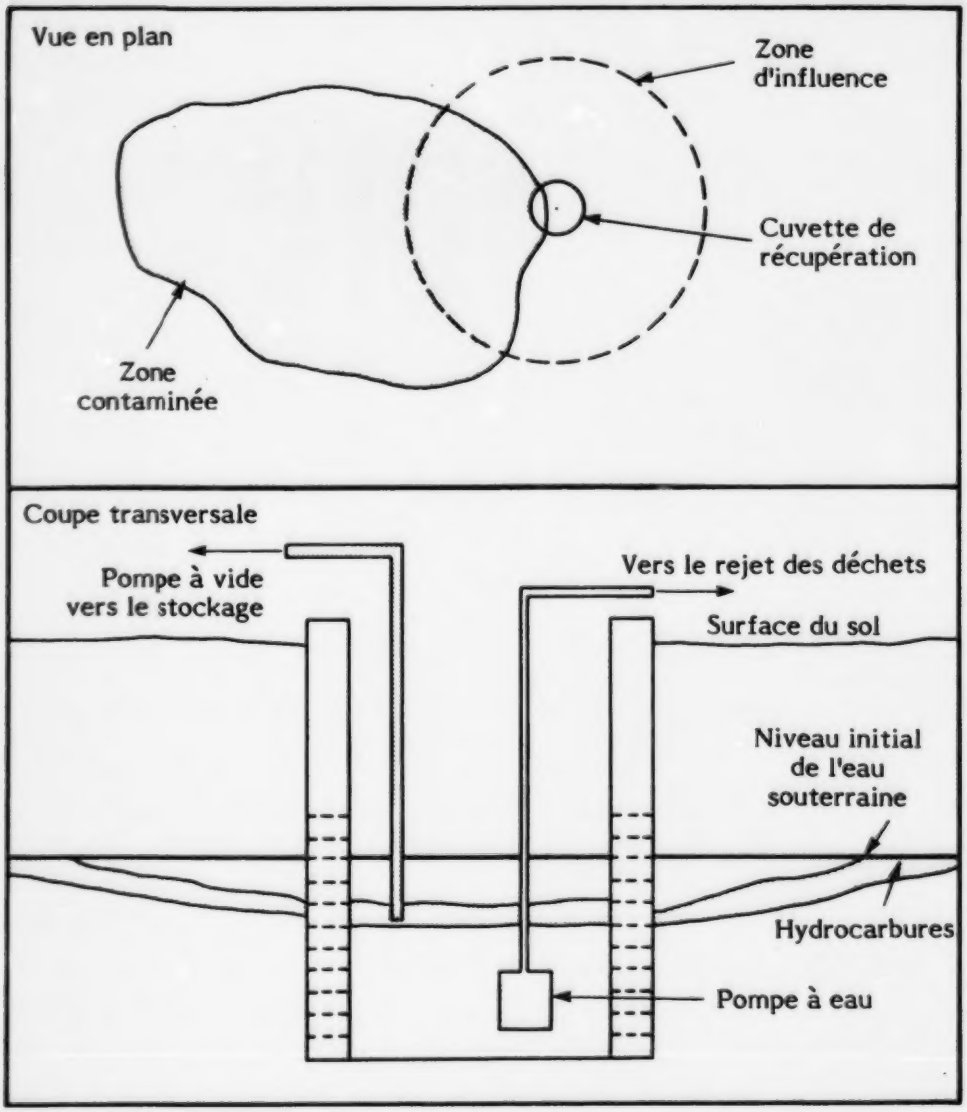


FIGURE 12 CUVETTE DE RÉCUPÉRATION (12)

Une variante à ce système consiste à utiliser une barrière formée d'un matériau imperméable comme une boue de bentonite-ciment. La barrière fait dévier les hydrocarbures vers une cuvette de récupération (figure 13). Cette méthode peut être utilisée sur les rives des cours d'eau pour intercepter les hydrocarbures qui, sinon, s'y déverseraient (12).

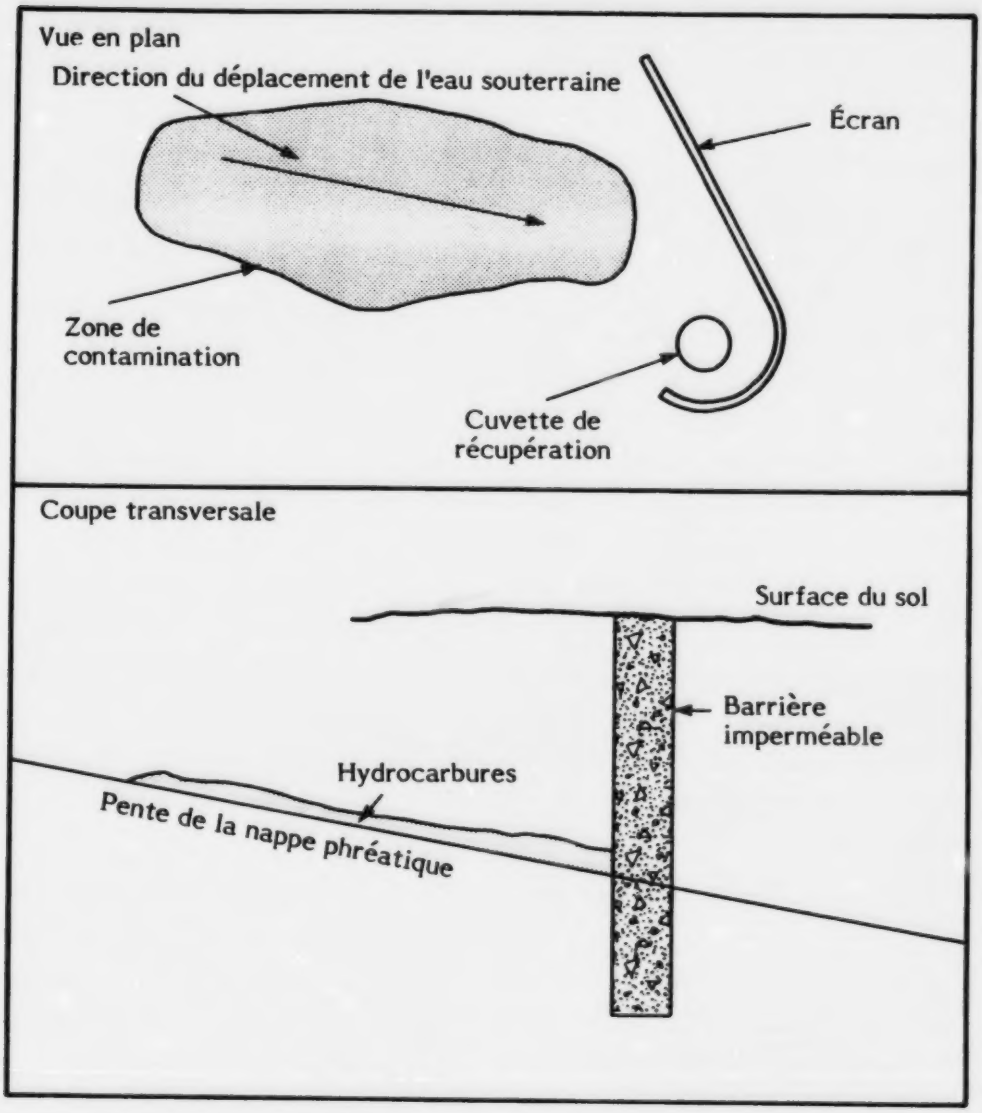


FIGURE 13 CUVETTE DE RÉCUPÉRATION AVEC BARRIÈRE DÉFLECTRICE (12)

Équipement. - Le tableau 10 (28) présente succinctement quelques systèmes commerciaux fréquemment utilisés pour récupérer des hydrocarbures dans l'eau souterraine, qui fonctionnent selon le principe de la double pompe.

4.2.2 Traitement de l'eau souterraine

Adsorption sur charbon. - L'adsorption sur charbon activé (CA) est un moyen de purification de l'eau contaminée fréquemment utilisé. De nombreux composants de la

TABLEAU 10 ÉQUIPEMENT DE RÉCUPÉRATION DE L'EAU SOUTERRAINE ET AUTRES PRODUITS (28)

1. Pétropurge-Hydropurge (NEPCCO)

Type: Double pompe

Description: La pompe Pétropurge est équipée d'une sonde qui distingue les hydrocarbures de l'eau souterraine (elle mesure l'épaisseur de la couche d'hydrocarbures et met la pompe en route lorsque cette épaisseur atteint une valeur préétablie).

La pompe de soutirage d'eau souterraine Hydropurge est conçue uniquement pour pomper de l'eau, et elle est commandée par une sonde qui détecte l'interface hydrocarbures-eau.

Remarques:
- Un tel système coûte environ 20 000 $, mais avec les accessoires (par exemple, un dispositif d'extraction à la vapeur) et l'installation, le coût peut monter jusqu'à 50 000 $ ($CAN).
- Peut traiter des volumes importants pendant des périodes prolongées.
- Conçue pour séparer 98 p. 100 des hydrocarbures.
- Nécessite un puits de petit diamètre (15 à 20 cm).
- Devrait récupérer de 3500 à 4500 litres d'hydrocarbures par semaine.

Fabricant: NEPCCO, Division de l'équipement

Distributeur: Sanivan Inc.

2. Scavenger (Oil Recovery Systems Inc.)

Type: Double pompe

Description: Ce système comprend un filtre épurateur (cartouche filtre montée dans un récupérateur flottant qui permet aux hydrocarbures de passer mais qui rejette l'eau) ou une sonde épuratrice (séparateur utilisé dans les espaces fermés; la pompe est commandée par une sonde qui distingue l'eau des hydrocarbures) et une pompe à eau submersible avec sonde de détection de dépression (pompe avec une sonde qui arrête la pompe lorsque des hydrocarbures atteignent sa valve d'admission).

Remarques:
- La sonde Scavenger peut être utilisée dans des puits de 10 cm ou plus.
- Le prix du système varie de 9000 $ à 12 000 $ ($CAN).
- Filtre Scavenger; taux de récupération maximale: 18 litres/mn; diamètre minimal du puit: 61 cm.
- Sonde Scavenger; taux de récupération maximale: 144 litres/mn; diamètre minimal du puits: 21 cm.
- Le produit récupéré ne devrait pratiquement pas contenir d'eau.

Fabricant: Oil Recovery Systems Inc.

Distributeur: RNG Equipment

3. Système d'écrémage SOS

Type: Système à deux pompes (entraînement pneumatique)

Description: Ce système comprend: une pompe à eau, un écrémeur à fonctionnement basé sur la densité ou un dispositif à membrane perméable aux hydrocarbures écrémant jusqu'à 0,5 mm tel qu'indiqué et une pompe de récupération d'hydrocarbures. Un système de commande pneumatique sert à régler le débit de la pompe selon les fluctuations de l'écoulement de l'eau souterraine et le niveau du réservoir de récupération.

Remarques:
- En cas de déversements importants, on peut grouper plusieurs écrémeurs à densité.
- Le système SOS (Selective Oil Skimming) peut être installé dans un puits de 10 cm de diamètre intérieur et les écrémeurs à densité dans un puits de 5 cm de diamètre intérieur. Ces deux systèmes peuvent être utilisés dans un puits peu profond (jusqu'à 5 m) ou un puits profond (jusqu'à 60 m). Dans le cas d'un puits profond, une pompe en tandem est placée au-dessus du dispositif d'écrémage.
- Les coûts du système d'écrémage sélectif d'hydrocarbures et des écrémeurs à densité sont d'environ 5000 $US et 8000 $US pour l'utilisation dans des puits peu profonds, et 6000 $US et 10 000 $US pour des puits profonds. Certaines pièces des dispositifs peuvent facilement être remplacées par des pièces de fabrication canadienne, ce qui réduira d'autant les coûts pour les acheteurs canadiens.
- Les écrémeurs à densité utilisés dans un puits de 5 cm devraient permettre de récupérer 110 litres/h d'hydrocarbures avec un soutirage de 20 litres/mn d'eau.
- La pompe utilisée dans un puits profond de 5 cm a les débits suivants: hydrocarbures: 1,0 litre/mn; eau: 6,0 litres/mn. Il devrait être possible d'obtenir des débits plus élevés dans des puits plus grands.

Distributeurs: Clean Environment Engineers

solution peuvent adhérer d'eux-mêmes à la surface du charbon activé, sous l'effet des forces d'attraction, jusqu'à ce que la concentration dans la solution soit à l'équilibre. On obtient le charbon activé à partir de matériaux comme le bois, le charbon, la tourbe ou la lignine qui sont déshydratés et carbonisés (c'est-à-dire brûlés à haute température en l'absence d'oxygène). Les pores du charbon s'élargissent sous l'effet de l'activation, ce qui augmente la surface de chaque particule de charbon et accroît la capacité d'adsorption globale.

Cette méthode dépend de la taille, de la structure, de la solubilité et de la polarité des molécules adsorbées, ainsi que du type de charbon, du pH de la solution et de la durée du contact avec le charbon. Le taux d'adsorption est fonction de la température et de la concentration. Le traitement implique le passage de la solution contaminée à travers des colonnes ou des lits de charbon activé, généralement installés sur place. L'efficacité du charbon doit être vérifiée régulièrement pendant les opérations, étant donné que ce matériau récupère moins bien les hydrocarbures après un certain temps. Ce seuil est appelé le point de "transition". Le charbon doit alors être remplacé ou régénéré; la régénération thermique peut souvent s'effectuer sur place si l'on dispose de l'équipement approprié.

Certains points sont à prendre en considération lorsque l'on applique cette méthode de traitement à l'eau souterraine contaminée. En commandant le charbon activé, il faut spécifier que c'est pour une utilisation sur le terrain. En mouillant le charbon avant de l'utiliser, on obtient une meilleure adsorption; mais l'opération peut prendre un ou deux jours et il faut utiliser de l'eau propre. Il est également nécessaire d'établir des courbes permettant de prévoir le point de "transition" de façon que les opérateurs sachent à quel moment il faut remplacer le charbon activé et(ou) utiliser d'autres colonnes. L'emploi de colonnes de charbon comme simples filtres est inapproprié parce que la capacité d'adsorption du charbon activé n'est pas utilisée. De ce fait, la clarification (ou filtration) avant adsorption sur charbon activé est généralement une étape de prétraitement nécessaire. Enfin, la stratification (couches du lit de charbon activé où différents composants peuvent être adsorbés), la bonne répartition de l'écoulement et un système de drain de sortie permettant d'éviter que le charbon soit entraîné par l'effluent améliorent l'efficacité du système. Si le système est bien employé, il est possible d'éliminer 95 à 100 p. 100 des contaminants associés aux hydrocarbures (comme le xylène, le toluène ou le benzène) présents dans la gamme des parties par milliard (ppM) et le bas de la gamme des parties par million (ppm). L'adsorption sur charbon activé est aussi utilisée comme processus de polissage lié à d'autres méthodes de traitement de l'eau lorsque la teneur en

contaminants est plus élevée. La Division des techniques d'intervention d'urgence d'Environnement Canada a procédé à l'évaluation d'un système de traitement par adsorption (29) appliqué à l'épuration de l'effluent fortement concentré d'un processus de traitement de l'eau par osmose inverse. Dans ces essais, l'unité de traitement par osmose inverse a concentré l'eau contaminée, en réduisant son volume à seulement 10 p. 100 de sa valeur initiale. L'eau concentrée a ensuite été traitée au charbon activé, et on a obtenu une adsorption supérieure à 95 p. 100 pour le benzène, le toluène, le trichloroéthane-1,1,1, et le trichloroéthène après que la concentration dans l'eau d'alimentation ait été portée, par osmose inverse, de 0,1-1 ppm à 1-10 ppm. On a ainsi éliminé de l'effluent d'un étang de drainage pétrochimique, en le traitant au charbon activé, 95 à 100 p. 100 du xylène, de l'éthylbenzène, du toluène, du benzène et de l'hexane après avoir porté leur concentration respective à 3,86 ppm, 0,54 ppm, 0,19 ppm, 2,6 ppm et 0,57 ppm, soit le double de leur concentration dans l'effluent.

Exemples d'équipements d'adsorption sur charbon activé qu'on peut se procurer dans le commerce pour le traitement des déchets dangereux:

Oil Recovery Systems Inc. (ORS) (28)

Distributeur: RNG Equipment

Équipement: Système de purification de l'eau par adsorption sur charbon activé

Remarques:
- Disponible en unités de 760 litres (38 l/mn) et 3780 litres (189 l/mn) nécessitant l'utilisation de respectivement 270 kg et 1360 kg de charbon activé.
- Il peut enlever le benzène, le toluène, le xylène et les BPC de l'eau (système conçu à l'origine pour traiter l'eau contaminée par l'essence et les BPC).
- Il peut être combiné à un purgeur d'air ou à un coalesceur ORS afin d'obtenir une purification plus complète de l'eau.

Calgon Canada (28)

Équipement: Système d'adsorption sur charbon activé à écoulement par gravité

Remarques:
- L'appareil est monté sur une remorque et l'on dispose de cuves d'adsorption prétubées simples ou multiples.
- Chaque cuve renferme environ 10 tonnes de charbon activé granulaire (deux qualités disponibles: Filtrasorb 300 et 400).
- Il permet d'extraire les colorants, phénols, pesticides, BPC, aromates, esters, éthers, cétones, composés non polaires comportant plus de quatre atomes de carbone et composés organiques réfractaires au traitement biologique lorsque les concentrations sont élevées ou faibles.

Extraction par l'air. - Avec ce procédé (28), l'eau contaminée tombe en cascade dans une colonne d'air forcé soufflé de bas en haut. La colonne contient un matériau de garnissage qui augmente la surface de contact entre l'eau et l'air. Les contaminants sont extraits de l'eau et entraînés à l'extérieur par l'air. Il est évident que les composés les plus volatils, comme les hydrocarbures légers, sont les plus faciles à extraire. L'efficacité de la méthode dépend du type de matériau de garnissage, de la hauteur de la colonne et de son diamètre, ainsi que du rapport air/eau. Lorsque le débit de l'eau est trop élevé, le système enlève une proportion moindre de contaminants; d'un autre côté, un débit excessif d'air entraîne l'augmentation du coût de l'opération, et il se peut que l'eau redescende le long des parois de la colonne et non sur le garnissage, phénomène connu sous le nom d'écoulement en rigole. Les produits non miscibles doivent être enlevés de l'eau à traiter afin d'éviter les dépôts sur le garnissage de la colonne.

L'extracteur par air induit est une variante de l'extraction par l'air, qui permet de pulvériser l'eau contaminée avec des buses qui envoient de grandes quantités d'air en même temps que l'eau. Les gouttelettes d'eau tombent dans le fond de l'appareil tandis que les contaminants volatils se transforment en vapeur et sont ventilés à l'extérieur. Cette technique est moins coûteuse que la méthode de la colonne avec garnissage, mais on ne peut éliminer qu'environ 60 à 85 p. 100 des composants organiques volatils (comparativement à 70 à 90 p. 100 avec une colonne). Que l'on utilise une colonne ou des gicleurs, l'extraction par l'air ne permet généralement pas d'obtenir de l'eau potable, et on l'utilise le plus souvent en combinaison avec une autre méthode de traitement.

Les gaz qui se dégagent dans ce traitement doivent satisfaire aux normes de qualité de l'air; l'effluent gazeux doit donc être traité dans la plupart des cas. L'extraction par l'air sans récupération de contaminants est maintenant interdite dans divers États américains. Le Centre technique des eaux usées d'Environnement Canada a évalué l'efficacité de la technique d'extraction par l'air pour éliminer de l'eau souterraine contaminée des produits organiques volatils (30). Il a utilisé différents types et dimensions de garnissages dans une colonne de PVC de 180 cm de haut, 15 cm de diamètre avec un rapport air/eau variant de 70:1 à 110:1. Plus de 99 p. 100 du benzène et du toluène présents dans l'eau à des concentrations respectives de 107 et 49 ppM ont été extraits. Le débit de liquide était de 4 l/mn, le rapport air/eau, de 70:1, et le garnissage était constitué de tampons Intalox de 1,3 cm. Les gaz extraits ont été traités au charbon activé dans deux adsorbeurs placés en série, ce qui a ramené la concentration de tous les composés de 1 à 40 ppM dans l'influent, soit à un niveau inférieur à la limite de détection de 2 ppM dans l'effluent. Les coefficients de transfert massique et la charge du charbon activé granulaire à saturation ont été comparés aux valeurs prévues.

Une étude précédente du Centre technique des eaux usées d'Environnement Canada a démontré que l'extraction par l'air de micropolluants dans l'eau souterraine concentrés au préalable (dans le bas de la gamme des ppm) en faisant appel à la technique de l'osmose inverse, n'influe pas sur l'efficacité de l'opération. L'influence sur l'efficacité de la préconcentration de l'extraction du système de traitement des gaz de dégagement reste encore à démontrer.

Exemples d'équipements d'extraction par l'air qu'on peut se procurer dans le commerce par le traitement des déchets dangereux:

Oil Recovery Systems Inc. (28)

Équipement: Système de purification de l'eau au moyen de l'extraction par l'air

Remarques:
- Il existe quatre modèles dont la capacité de traitement va de 95 à 454 litres/mn et 1703 à 3785 litres/mn.
- Les appareils sont en plastique renforcé à la fibre de verre.
- Les appareils comportent des sondes à haut et bas niveaux hydrostatiques et un éliminateur de brouillard.
- Parmi les options, on trouve les commandes automatiques, une armature en acier inoxydable, la protection contre le gel (résistances chauffantes, isolation).

NEPCCO, Division de l'équipement

Équipement: Systèmes Airpurge

Remarques:
- Équipement à fonctionnement continu, entièrement automatique, pouvant être fabriqué sur commande.

Calgon Canada (28)

Équipement: Système interphase - Extracteur par air et Programme informatisé d'extraction par l'air

Remarques:
- Un programme informatisé permet d'évaluer l'efficacité de l'extracteur (sans avoir à faire d'étude pilote sur place), compte tenu du nombre total de substances à extraire, de leur concentration dans le liquide à l'entrée, du débit d'entrée et des objectifs de traitement.
- Le programme indique quels seront la conception optimale et le rapport coût/bénéfice pour des extractions à des degrés plus élevés de contamination.

Extraction par la vapeur. - Selon cette méthode, la vapeur met suffisamment de temps pour passer à travers un liquide pour que les produits volatils passent de la phase liquide à la phase gazeuse. Elle est efficace pour récupérer des produits volatils et non miscibles comme l'essence, le gas-oil et les solvants.

La vapeur est introduite à la base de la colonne d'extraction, qui est remplie de matériau de garnissage ou équipée de plateaux permettant d'améliorer le contact entre les deux phases, et le liquide d'alimentation est introduit au sommet ou à proximité de celui-ci. La vapeur qui sort de la colonne contient les produits volatils. Elle est ensuite condensée, et les produits insolubles sont récupérés dans un décanteur.

L'application de ce procédé dépend principalement du point d'ébullition des matières organiques à séparer de la phase aqueuse. Les constantes de la loi de Henry, qui tiennent compte de la facilité d'extraction et de la volatilité des produits ainsi que leur solubilité, doivent être aussi prises en considération. Les matières organiques qui ont un point d'ébullition relativement bas (inférieur à 150 °C), une constante de la loi de Henry entre ~10^{-3} et 10^{-4} atm . m^3/mole et une solubilité inférieure à 1000 ppm sont considérées comme pouvant être facilement extractibles par la vapeur (32). Les hydrocarbures auxquels cette méthode convient bien sont le benzène, le toluène et l'hexane (33).

Les avantages de l'extraction par la vapeur par rapport à ceux de l'extraction par l'air sont la possibilité de concentrer et récupérer les contaminants et de réduire l'émission de matières organiques volatiles dans l'air. Dans certains cas, l'extraction par la vapeur peut servir à suffisamment concentrer les matières organiques volatiles pour obtenir un produit qui assurera sa propre combustion. L'extraction par l'air est rentable pour des liquides dont la teneur en solvants est de moins de 1 p. 100, mais l'extraction par la vapeur convient bien aux produits volatils dans les solutions aqueuses ayant une teneur en solvants pouvant atteindre 10 p. 100. La méthode d'extraction par l'air peut être très efficace; et on peut l'utiliser pour polir les eaux traitées par extraction par la vapeur. Pour concentrer encore davantage des produits de tête d'extraction par la vapeur, on peut utiliser la méthode d'extraction par solvant (32).

Il faut procéder au traitement préalable du produit d'arrivée afin d'éviter l'encrassement du garnissage de la colonne par des produits non miscibles.

Osmose inverse. - Pour bien comprendre le principe de l'osmose inverse, il faut d'abord savoir ce qu'est l'osmose. Ce phénomène implique le mouvement des solvants à travers une membrane semi-perméable, qui sépare une solution à faible teneur en soluté d'une solution à teneur élevée en soluté. Leur déplacement est provoqué par les gradients de concentration, et il s'arrête lorsque les teneurs en soluté sont égales de chaque côté de la membrane. Dans le cas de l'osmose inverse, une pression est appliquée à la solution la plus concentrée, ce qui inverse l'écoulement naturel du solvant. D'une façon générale, la pression appliquée doit être de l'ordre de 2068 à 6895 kPa (300 à 1000 lb/po^2) de façon à contrecarrer la pression osmotique de la solution: le solvant (généralement de l'eau)

traverse la membrane tandis que les produits solutés sont rejetés. Il ne s'agit pas d'une séparation basée sur la dimension des molécules solutées; le type et la quantité de substances extraites dépendent de la structure chimique de la membrane, de la nature chimique et physique des substances et de la solution, ainsi que de la porosité de la membrane et des conditions de recirculation. Les membranes elles-mêmes sont généralement faites d'acétate de cellulose ou de minces films composites (polymères), et se présentent généralement sous la forme de spirales, de fibres creuses ou de tubes.

Les avantages de cette méthode sont les suivants: il n'y a pas de changement de phase, la technique s'applique aussi bien aux liquides qu'aux gaz et elle exige une consommation d'énergie inférieure à celle de la plupart des autres méthodes de séparation. Cependant, l'eau d'alimentation doit souvent être pré-traitée afin d'éviter le colmatage des membranes par les matières en suspension, le développement de bactéries sur les membranes, l'accumulation de carbonate de calcium ou de silice, ainsi que l'hydrolyse due aux eaux acides ou alcalines. Une préfiltration appropriée permet d'éliminer les matières en suspension, et l'addition d'hexamétaphosphate de sodium au produit d'arrivée permet de détruire les bactéries. L'acidification du produit d'arrivée enlève le carbonate de calcium (34).

La Division des techniques d'intervention d'urgence d'Environnement Canada a procédé à l'évaluation de l'efficacité de l'osmose inverse sur des produits de lixiviation contenant des hydrocarbures en utilisant une unité mobile (34, 35).

Lors de l'essai effectué en 1984 à un site contaminé localisé dans Gloucester (Ontario), on a pu atteindre un taux d'extraction du benzène de 97 p. 100 en utilisant une membrane en polyéther-polysulfone. La concentration de benzène dans l'eau souterraine a été ramenée à moins de 4 ppM, alors qu'elle était de 70 à 120 ppM. En 1986, une partie plus concentrée du panache a fait l'objet d'essais plus poussés. Les teneurs en benzène et en toluène ont été ramenées de 1530 et 280 ppM à 55 et 10 ppM en utilisant le même type de membrane et le même rapport de recirculation. On a pu atteindre un coefficient d'extraction de 96 p. 100 dans les deux cas.

Aux installations de Shell, à Toronto, le produit de lixiviation contenant du toluène (0,09 ppm), du xylène (2,79 ppm), du benzène (1,31 ppm), de l'hexane (0,30 ppm) et de l'éthylbenzène (0,23 ppm), a aussi été traité avec succès à l'aide de membranes en polyéther-polysulfone. Les concentrations et les rendements d'extraction obtenus ont été les suivants: toluène (0,02 ppm, 78 p. 100), xylènes (0,4 ppm, 86 p. 100), benzène (0,43 ppm, 67 p. 100), hexane (0,01 ppm, 97 p. 100) et éthylbenzène (0,03 ppm, 87 p. 100).

Exemples d'équipements d'osmose inverse qu'on peut se procurer dans le commerce pour le traitement des déchets dangereux:

Division des techniques d'intervention d'urgence, Environnement Canada

Équipement: Unité mobile d'ultrafiltration et d'osmose inverse (UF/OI)

Remarques:

- Cette unité permet de prouver l'efficacité de la technique pour traiter les déchets dangereux en solution qui n'ont pas fait l'objet d'essais, ainsi que pour les urgences environnementales.
- L'unité, montée sur remorque et munie de pompes à moteur diesel, peut être transportée par hélicoptère.
- Elle peut produire jusqu'à 1800 litres/h d'eau pure à partir d'eau salée et peut contenir jusqu'à 12 membranes pour ultrafiltration ou osmose inverse.
- Elle contient suffisamment de combustible pour fonctionner sans interruption pendant huit heures et possède un système intégré de chauffage au propane pour éviter les effets du gel pendant la saison froide.
- Le dispositif s'arrête automatiquement si les pressions et les températures normales d'exploitation ne sont pas maintenues, si une sortie est bloquée ou si une membrane se rompt.
- Efficace dans le cas de certaines matières organiques ou inorganiques en solution aqueuse dont le pH se situe entre 2 et 11 (BPC (36), PCP (37), matières organiques volatiles (29), pesticides (38), eaux usées huileuses (39)).

Entreprise: Memcare Inc.

Entreprise: Seagold

Entreprise: Seprotech Systems Inc.

Entreprise: Zenon Environmental Inc.

Ultrafiltration. - L'ultrafiltration (UF) est une méthode de séparation à commande pressostatique qui permet de concentrer des produits dilués ou de récupérer certains produits chimiques, tout en opérant à des pressions inférieures à celles de l'osmose inverse (28). Cette méthode donne de meilleurs résultats avec des substances à masse moléculaire élevée, étant donné qu'elle est basée sur la taille des molécules. Les membranes à ultrafiltration ont des pores allant de 10^{-8} à 10^{-2} µm et fonctionnent à des pressions variant entre 0,18 et 1,1 MPa, tandis que d'autres matériaux (comme le tissu ou les écrans métalliques) peuvent séparer des particules n'ayant pas moins de 1 µm. Le pouvoir de séparation de l'ultrafiltration est déterminé par la porosité et l'épaisseur du milieu filtrant, ainsi que par les variables du système (c'est-à-dire la pression, la température, la vitesse d'alimentation et la composition des déchets). Un avantage

important de l'UF tient au fait qu'elle peut être pratiquée à une pression inférieure à celle nécessaire pour l'osmose inverse, parce que les milieux UF sont microporeux et que la pression osmotique des matériaux retenus par eux est si basse qu'elle n'influe pratiquement pas sur le flux du solvant. Cette méthode est beaucoup plus lente que les méthodes à haute pression comme celle de l'osmose inverse; cependant, l'UF peut parfois être remplacée par l'OI, en utilisant le même équipement de base, afin d'augmenter les diverses possibilités de traitement. Les membranes d'ultrafiltration se présentent sous la même forme que les membranes d'osmose inverse, c'est-à-dire sous forme tubulaire, en spirale ou en fibres creuses, et elles sont généralement constituées d'acétate de cellulose ou de matières inorganiques comme l'oxyde de zirconium. Elles peuvent aussi être faites sur mesure, et avoir des pores de dimensions différentes pour séparer des substances dont la masse moléculaire se situe entre 500 et 200 000 g/mole (Osmonics, The Filtration Spectrum, 1984), mais les molécules en solution doivent être au moins dix ou cent fois plus grandes que les molécules du solvant. Les membranes peuvent se colmater et se détériorer comme les membranes d'osmose inverse, mais généralement dans une moindre mesure. Les déchets contenant des quantités élevées de substances de faible masse moléculaire peuvent aussi nécessiter un traitement supplémentaire de l'effluent.

Exemples d'équipements d'ultrafiltration qu'on peut se procurer dans le commerce pour le traitement des déchets dangereux:

Division des techniques d'intervention d'urgence, Environnement Canada

Équipement: Unité mobile d'ultrafiltration et d'osmose inverse

Remarques: - Voir le chapitre sur la récupération par la vapeur

Romicon Inc. - Filiale de Rohm & Haas Company

Équipement: Système UF à fibres creuses

Remarques:
- Utilisé dans diverses industries chimiques, ce système peut purifier l'eau contaminée par les hydrocarbures.
- L'équipement comprend des cartouches à fibres creuses, un réservoir de stockage perméable, des pompes de circulation et de chasse par reflux.
- Le liquide est envoyé sous pression à l'intérieur des fibres; la séparation se produit à l'interface liquide-membrane; les solutés et les particules rejetés demeurent à l'intérieur de la paroi et le filtrat passe à travers les fibres creuses.
- L'écoulement le long des fibres creuses peut être contrôlé de façon à produire des forces de cisaillement élevées qui détachent les particules et les entraînent en aval.
- Les cartouches sont nettoyées par lavage, recyclage, refoulement ou par une combinaison de ces trois méthodes.

- Cette opération se fait à des températures de 15 °C à 75 °C et à un pH de 1,5 à 13,0.
- Le système peut traiter de 2,8 à 5,6 m^3/j jusqu'à 70,9 à 141,9 m^3/j.

Séparation par gravité. - En cas d'urgence, il arrive souvent que pour procéder aux opérations de récupération, on installe une seule pompe submersible ou d'aspiration qui récupère à la fois l'eau souterraine et les hydrocarbures qui flottent à sa surface. Un moyen simple de traiter le mélange hydrocarbures-eau recueilli par cette méthode consiste à les séparer par gravité. Le mélange récupéré est laissé au repos, afin que les hydrocarbures non miscibles et l'eau forment deux couches distinctes (figure 14). Ce système est facile à utiliser et peu coûteux à mettre en place, et quelques heures suffisent en général pour l'installer. Cette méthode ne permet cependant pas d'éliminer les matières solubles dissoutes dans l'eau, et il faut lui adjoindre des méthodes complémentaires de séparation.

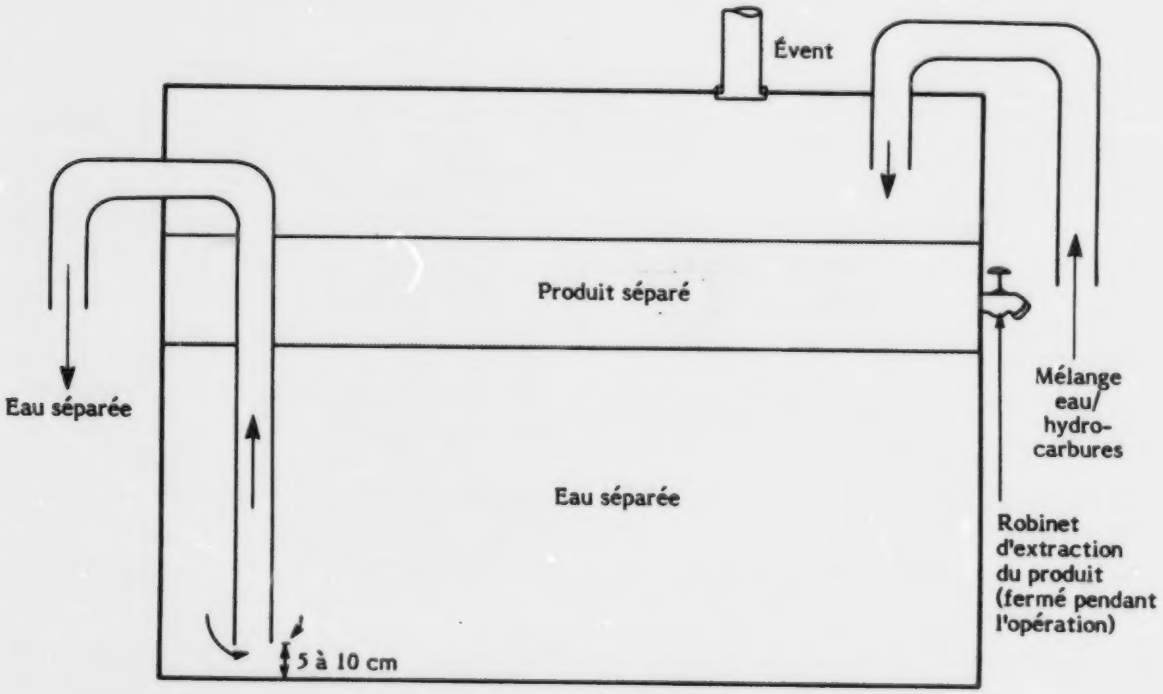


FIGURE 14 SÉPARATION PAR GRAVITÉ

Recharge. - Un moyen d'accélérer le nettoyage et d'éliminer l'eau traitée consiste à la renvoyer dans l'aquifère. Cette opération permet aussi d'extraire par lavage une partie des hydrocarbures résiduels du sol, et elle convient particulièrement aux récupérations à grande échelle. Cette méthode offre plusieurs avantages. Les puits de recharge permettent d'augmenter la pente hydraulique de l'eau souterraine et de diminuer le nombre de puits de récupération nécessaires. Ils permettent également de stabiliser les gradients hydrauliques en direction des puits de pompage, ce qui améliore les taux de récupération et réduit les coûts d'exploitation à long terme. En outre, cette méthode permet de traiter de grands volumes d'eau pendant une période indéfinie (26).

Le succès de cette méthode dépend de sa conception, de son application et de l'entretien. Il est parfois nécessaire de traiter l'eau pompée avant de la renvoyer dans le sol (système ouvert). Cette décision dépend de la qualité de l'eau obtenue et de la méthode de récupération. Une analyse des coûts est nécessaire avant d'entreprendre tout traitement. Par exemple, si l'eau nécessite un traitement intensif, les coûts d'investissement et d'entretien à long terme risquent de dépasser ceux de creusage et de remplacement des puits, en particulier dans le cas d'aquifères peu profonds (inférieurs à 15 m) dont les coûts de construction sont faibles. Le traitement de l'eau en vue d'extraire les matières dissoutes avant de la renvoyer dans la nappe aquifère peut être également coûteux, en particulier si le sol contient de grandes quantités d'hydrocarbures, auquel cas le traitement est particulièrement inutile, étant donné que les hydrocarbures résiduels continuent à s'infiltrer dans la nappe phréatique pendant des décennies (26).

Certains autres points doivent être pris en considération avant d'entreprendre le traitement. L'eau traitée peut ne plus être compatible avec l'eau de l'aquifère et provoquer une réaction et(ou) une précipitation dans ce milieu. Certaines étapes de traitement, comme l'aération de l'eau, peuvent entraver la recharge. Par exemple, dans le cas d'une eau à teneur élevée en fer, l'aération peut entraîner la précipitation d'hydroxyde de fer et accélérer le développement de bactéries aérobies, facteurs qui peuvent contribuer à boucher les puits de recharge. Les systèmes de filtration peuvent aussi être des milieux propices au développement bactérien, et il faut les vérifier, les nettoyer et les désinfecter périodiquement. La présence d'algues n'est généralement pas un problème, à moins que l'eau obtenue ne soit aérée et laissée au soleil pendant longtemps, comme dans les bassins de décantation. Il faut donc procéder à un contrôle de la qualité de l'eau traitée et, avant de procéder à la recharge, il faut vérifier si elle nuit aux propriétés de lessivage des hydrocarbures (26).

Selon Blake et Fryberger (26), il est plus rentable de simplement renvoyer l'eau provenant du puits de récupération directement dans l'aquifère. Le système est totalement fermé et on peut le concevoir de façon que l'eau ne soit jamais en contact avec l'air. Il est essentiel que le système soit bien conçu, en particulier le choix de l'emplacement des puits, sinon il en résultera une augmentation des coûts et il sera impossible de contenir le déversement. Des difficultés se présentent aussi avec le système de recharge direct, à savoir le colmatage (par les matières en suspension, les bulles d'air, les précipitations chimiques, les émulsions et la multiplication des bactéries), des réactions de formation, ainsi que la décharge accidentelle d'hydrocarbures par la pompe à eau. Ce dernier problème oblige à installer un dispositif de sécurité qui interrompt le fonctionnement de la pompe en présence d'hydrocarbures. Un système de recharge fermé présente l'avantage d'être peu coûteux et extrêmement souple; tous les puits de récupération et les puits de recharge sont des systèmes autonomes (26).

4.2.3 Récupération des sols contaminés. - Le seul moyen de récupérer des sols contaminés est l'excavation. Avant d'y procéder, il faut recueillir des informations sur le niveau de la nappe phréatique et la géologie du sol, ainsi que sur la profondeur de pénétration des hydrocarbures dans le sol, car il n'est pas toujours possible de procéder à une excavation, en particulier si l'on envisage l'enlèvement de grandes quantités de sol. En général, on ne devrait enlever le sol que pour protéger l'eau souterraine, ou lorsque le sol saturé d'hydrocarbures constitue un danger pour la santé, et que la décontamination doit être effectuée rapidement. L'excavation est cependant souvent rendue impossible à cause des conditions locales, et il faut user de beaucoup de précautions dans les zones urbaines, afin de ne pas endommager les canalisations et les câbles souterrains, les fondations des édifices voisins, et de ne pas déstabiliser les terrains en pente (par exemple, les remblayages des routes et voies de chemins de fer, les retenues sur les canaux).

Si l'on doit enlever de la terre, il faut utiliser un support quelconque comme des palplanches pour éviter les éboulements. Sachant que les produits volatils peuvent exploser ou produire des mélanges asphyxiants, des essais à l'explosimètre doivent être effectués avant de commencer les travaux, ainsi que pendant leur déroulement. Il faut utiliser des respirateurs autonomes lorsque l'air est insalubre.

Il faut veiller à ce que les excavations ne traversent pas les couches imperméables naturelles du sous-sol (comme les couches d'argile), afin que les déversements ne risquent pas de pénétrer plus avant dans le sol. Les excavations doivent également être faites aussitôt que possible après un déversement, afin d'avoir à enlever le

moins de terre possible. Il est évident que cela n'est pas souvent possible dans le cas des réservoirs souterrains qui fuient lentement, car les fuites peuvent passer inaperçues pendant des années et affecter un secteur important avant que des mesures puissent être prises. Enfin, CONCAWE (23) recommande de ne procéder à des excavations que lorsque la contamination par les hydrocarbures est évidente. Il n'est pas justifié d'extraire des quantités de sol contaminé par des hydrocarbures qui ne peuvent être décelés que par leur odeur. L'enlèvement de grandes quantités de sol contaminé est coûteux et les méthodes de traitement *in situ* devraient être envisagées en premier lieu, à moins qu'il n'existe un danger pour la santé (23).

4.2.4 Traitement du sol

Dégradation biologique. - La dégradation biologique des hydrocarbures consiste en leur décomposition par des microorganismes, avec formation finale de cellules microbiennes, de dioxyde de carbone et d'eau. Les types de microorganismes qui attaquent les hydrocarbures comprennent les bactéries, les moisissures, les algues, les actinomycètes et les protozoaires, qui se trouvent tous en général à la surface du sol et dans l'eau. Les bactéries sont les principaux éléments de décomposition, car ils sont les organismes les plus nombreux dans le sol et les plus actifs biochimiquement (28). Leur très petite taille leur permet d'atteindre la couche de sol proche de la surface. En fait, on a trouvé des bactéries aérobies dans des formations perméables jusqu'à des profondeurs de plusieurs milliers de pieds, bien qu'elles aient une activité plus limitée à cette profondeur à cause des faibles quantités d'oxygène et de substances nutritives disponibles. Les bactéries anaérobies peuvent vivre grâce à l'oxygène qu'elles trouvent dans les substances chimiques, mais elles dégradent les hydrocarbures beaucoup plus lentement que les bactéries aérobies.

La biodégradation des hydrocarbures varie selon leur composition chimique. Les substances les plus biodégradables sont les hydrocarbures paraffiniques à chaîne droite. Les paraffines et cycloparaffines à chaîne ramifiée se décomposent plus lentement. Les produits aromatiques se décomposent plus vite que les cycloalkanes (40), mais les produits ne contenant pas d'hydrocarbures (en particulier ceux qui ont des masses moléculaires élevées) sont décomposés lentement (27).

Pour consommer des hydrocarbures, les microorganismes ont besoin de trois choses: de l'oxygène, des substances nutritives et de l'humidité. Le premier est nécessaire parce que la décomposition des hydrocarbures par les microbes est essentiellement un processus d'oxydation. L'oxygène que contient l'air, l'oxygène pur, le peroxyde d'hydrogène

ou l'ozone répondent à ce besoin. En outre, une rapide biodégradation des hydrocarbures exige la présence de certaines substances nutritives comme l'azote (généralement sous la forme d'ammoniac ou de nitrate) et le phosphore (généralement sous la forme de phosphate). D'autres substances nutritives, comme les minéraux, sont nécessaires en plus petites quantités, et il y en a généralement suffisamment dans le sol.

Les bactéries ne peuvent pas se développer dans un sol complètement sec; il leur faut de l'eau pour absorber leur nourriture dissoute (dans ce cas, des hydrocarbures). Elles se développent mieux dans un sol humide et friable.

La dégradation des hydrocarbures a lieu rapidement dans des conditions optimales d'aération, d'humidité et de nourriture, conditions qui existent rarement dans la nature, mais que l'on peut créer artificiellement en insufflant de l'air et des éléments nutritifs dans le sol par les puits (27, 41). Outre la nourriture, il est possible d'obtenir une biodégradation plus rapide des hydrocarbures lorsque la culture de bactéries a déjà été acclimatée à détruire les hydrocarbures. Il existe des produits commerciaux qui se présentent sous forme de cultures microbiennes ou bactériennes séchées. Le sol et l'eau contiennent déjà des microorganismes capables de consommer des hydrocarbures; c'est pourquoi il suffit généralement de fournir la substance nutritive, l'aération et l'humidité appropriées pour stimuler leur activité (27).

La surface interfaciale totale entre les hydrocarbures et le sol, ainsi qu'entre les hydrocarbures et l'eau, est le facteur qui influe le plus sur leur taux de biodégradation dans le sol: plus cette surface est grande, plus le taux de dégradation est élevé. Les poches d'hydrocarbures en excès peuvent diminuer la surface interfaciale; il faut donc les répartir dans la zone contaminée en labourant ou retournant le sol et en mélangeant le sol contaminé avec le sol intact, et vice versa. Le taux de biodégradation est plus élevé à proximité de la surface du sol contaminé, en particulier si celui-ci a été retourné et mélangé afin de l'aérer, et que l'on fournit les substances nutritives et l'humidité appropriées. Le taux de biodégradation diminue directement en fonction de la profondeur dans le sol, étant donné que l'aération et l'alimentation en substances nutritives diminuent. Ce taux est à son minimum lorsque les hydrocarbures atteignent la nappe phréatique, ce qui entraîne une réduction de l'approvisionnement en oxygène et en substances nutritives, ainsi qu'une augmentation marquée de la saturation du sol par les hydrocarbures. Dans ce cas, les hydrocarbures finissent par se répandre sur la nappe phréatique, ce qui augmente la surface interfaciale et rend les sols plus sujets à la biodégradation (27).

En résumé, il existe deux méthodes de dégradation biologique: la stimulation de l'activité de la population native de microorganismes au sein de l'aquifère, en

assurant des conditions optimales d'oxygène, de substances nutritives et d'humidité (42, 43, 44), et l'addition de microorganismes acclimatés à consommer des hydrocarbures (42). La biodégradation est le processus qui convient le mieux au traitement des quantités résiduelles d'hydrocarbures dans le sol lorsqu'il n'est plus possible de faire appel aux techniques classiques de traitement de l'eau souterraine et du sol.

Exemples d'équipements qu'on peut se procurer dans le commerce pour le traitement des déchets dangereux.

Polybac Corporation

Équipement: Polybac Mutant Bacterial Hydrocarbon Degrader (28)

Remarques:
- Comprend des microorganismes mutants et adaptés et des accélérateurs biochimiques.
- Il existe trois souches de bactéries assurant la dégradation de types particuliers de produits chimiques organiques: Hydrobac, Phenobac et Petrobac. La souche Hydrobac dégrade les eaux usées des raffineries et usines pétrochimiques ou les déversements contenant un grand nombre de produits chimiques en concentration faible; la souche Phenobac est active en particulier en présence de surfactants et de détergents synthétiques; la souche Petrobac est utilisée pour la dégradation de matières organiques difficiles à traiter dans le sol ou l'eau salée.
- Les bactéries sont déshydratées; elles sont réactivées avec de l'eau (1:10) pour former une suspension.
- Le taux de dégradation dépend des produits chimiques en cause, de la température et des conditions du sol.
- Polybac E (un émulsifiant biodégradable) peut être ajouté aux dégradeurs pour augmenter la surface de contact entre les microorganismes et les contaminants.
- On peut aussi utiliser des substances nutritives (Polybac N).
- La température optimale varie entre 10 et 40 °C.
- Les bactéries doivent demeurer complètement déshydratées jusqu'au moment où elles sont utilisées.

FMC Corporation, Specialty Chemicals Division (28)

Équipement: Programme amélioré de biorégénération (Aquifer Remediation Systems (ARS))

Remarques: L'entreprise offre un programme en trois phases, soit l'évaluation des sites (Site Assessment), la conception du processus (Process Design) et la mise en application du programme (Program Implementation).
- La première phase coûte de 5000 $ à 10 000 $ ($US, 1985) pour les sites pétroliers, et elle comprend l'échantillonnage

de l'eau souterraine, l'analyse en laboratoire et l'examen des informations sur les sites.

- La seconde phase coûte de 10 000 $ à 30 000 $ ($US, 1985) et elle permet d'évaluer dans quelle mesure un programme ARS qui comprend l'échantillonnage et l'évaluation du sol peut être appliqué.
- La troisième phase coûte de 50 000 $ à 150 000 $ ($US, 1985) et elle comprend l'installation et l'exploitation de l'équipement, la surveillance et la détection des problèmes, ainsi que la fermeture des sites.

Groundwater Technology Inc., Division de Oil Recovery Systems Inc.

Équipement: Enhanced Natural Degradation (END)

Remarques: L'entreprise offre un programme en trois phases, soit l'évaluation des sites (Site Assessment), la mise en oeuvre (Activation) et le contrôle (Monitoring).

- La première phase porte sur la détermination de l'étendue de la contamination et le déplacement des contaminants.
- La seconde phase consiste à contenir et contrôler le cône de diffusion des contaminants en abaissant le niveau de la nappe phréatique afin de récupérer le contaminant flottant. L'eau déchargée est nettoyée à l'air pour éliminer les hydrocarbures dissous. Elle est ensuite renvoyée dans l'aquifère avec les substances nutritives et l'oxygène nécessaires pour dégrader les contaminants laissés dans le sol.
- La troisième phase consiste à vérifier l'efficacité du traitement en analysant des échantillons d'eau souterraine. On modifie la concentration de substances nutritives si nécessaire.

Compostage. - Cette méthode est une forme de dégradation biologique, mais elle diffère quelque peu de celle qui précède. Dans ce cas-ci, le sol contaminé par des matériaux organiques est creusé puis aéré soit par mélange, soit par aération forcée, afin de stimuler le développement des bactéries aérobies. Il existe quatre types essentiels de systèmes de compostage: systèmes fermés, andains, aération forcée et labourage. Ce sont tous des traitements à long terme qui, selon la concentration des contaminants dans le sol, peuvent prendre des années pour les biodégrader. Comme on l'a vu au chapitre précédent, les microorganismes peuvent être ceux qui existent déjà dans les déchets organiques ou ceux provenant d'autres sources.

Un système de compostage fermé comprend des digesteurs ou bassins équipés d'agitateurs ou d'aérateurs. Le matériau contaminé est simplement extrait et placé dans de grands bacs, puis aéré. Le polluant s'écoule aussi, dans une certaine mesure, du

matériau traité et tombe au fond des bassins. Le traitement par andains est assez semblable, sauf que le sol imprégné d'hydrocarbures est mis en tas et que le terrain non contaminé reste à l'air libre. Cette méthode perturbe beaucoup le sol, en surface, mais elle n'exige qu'un faible investissement et ne consomme que peu d'énergie. On peut ajouter des fertilisants au sol pour accélérer la décomposition bactérienne des hydrocarbures. Il est aussi possible d'ensemencer les andains une fois que la teneur en contaminants a été réduite, et le sol mis en andain, une fois drainé, peut être répartie sur l'ensemble de la surface, puis ensemencé. Ces méthodes servent à assécher les zones environnantes et stimulent la revégétation. L'aération forcée est une variante du traitement par andains. Des soufflantes d'air servent à extraire l'air de la base de la masse organique et à le faire passer à travers un tube perforé. Enfin, le labourage consiste à mélanger le sol contaminé à la couche supérieure du sol à l'aide d'équipement agricole ou de construction conventionnel. Le sol est généralement réensemencé et l'on facilite la croissance de la végétation par ajout de fertilisants. Cette technique convient dans le cas des polluants qui se décomposent rapidement, ne sont pas toxiques pour les microorganismes du sol, les plantes ou les animaux, et n'ont pas d'effets toxiques à long terme par suite de l'adsorption ou de l'échange d'ions dans le sol. De plus, le polluant ne doit pas contenir de substances pouvant nuire à la qualité de l'eau souterraine ou à la structure du sol, en particulier à ses caractéristiques d'infiltration, de percolation et d'aération.

Bien que l'on utilise le compostage depuis de nombreuses années pour amender les terres agricoles, cette méthode présente des possibilités limitées pour ce qui est du traitement du sol, en raison de sa vulnérabilité aux changements climatiques, de la main-d'oeuvre qu'elle nécessite et de la lenteur du processus. Cependant, étant donné qu'elle ne requiert que peu d'investissements et qu'elle peut être utilisée sur place, elle est une solution de traitement valable pour les sols contaminés par les hydrocarbures.

Incinération. - Une méthode de destruction de déchets organiques fréquemment utilisée consiste à les brûler. Le sol saturé d'hydrocarbures peut être nettoyé en le mettant dans un four où les hydrocarbures sont brûlés. Cette technique ne convient pas aux déversements étendus, étant donné qu'il n'existe pas sur le marché d'incinérateurs capables de traiter de grands volumes de sol. Cependant, on a construit un prototype de four rotatif capable de traiter 0,5 à 2 tonnes/h de sable contenant 8 à 15 p. 100 d'hydrocarbures. Ce prototype, qui s'inspire d'un modèle conçu par Trecan Ltd. pour Environnement Canada et PACE, a été construit et modifié à l'emplacement d'un déversement (45, 46). Un modèle semblable en acier inoxydable a été construit pour la base Canmar à Tuktoyaktuk, dans les Territoires du Nord-Ouest.

Entreprise: Trecan Ltd.
Équipement: Four rotatif

Entreprise: Canmar
Équipement: Four rotatif

Fixation. - Ce procédé consiste à immobiliser, isoler ou contenir les déchets par un moyen quelconque et à obtenir un matériau solide à partir de déchets semi-solides ou liquides. La fixation empêche les déchets de réagir à l'environnement immédiat ou de s'y introduire par lixiviation. Idéalement, la fixation devrait rendre les déchets non réactifs et les immobiliser dans une matrice solide qui soit stable, qui résiste aux cycles gel-dégel, qui ait une faible perméabilité, qui présente une tolérance aux contraintes élevées et qui résiste à l'attaque des agents biologiques. Le produit final est souvent utilisé dans les travaux de construction de routes ou est brûlé dans une décharge. Parmi les techniques de fixation, on compte celles à base de matériaux comme le ciment, la chaux, les thermoplastiques (comme le bitume, la paraffine et le polyéthylène), ainsi que les polymères organiques, ainsi que des techniques comme l'encapsulation, la vitrification et l'auto-cimentation. Ces méthodes sont résumées et comparées au tableau 11 (28). Toutes ces techniques nécessitent généralement un investissement important. On a expérimenté le procédé de stabilisation par de la poussière de four à ciment, qui est moins coûteuse que le ciment lui-même, en procédant au traitement *in situ* d'une boue composée d'hydrocarbures, d'eau et de matières solides dans une proportion de 50/35/15, les hydrocarbures étant du pétrole brut comportant des résidus lourds; la poussière de ciment a été utilisée dans un rapport de 3:1 (poussière:pétrole) et mélangée en se servant d'un bouteur (47). Le tableau 12 donne un aperçu des systèmes actuellement sur le marché (28). Les méthodes Chemfix et Soil Recovery Inc. sont les deux seuls systèmes mobiles cités dans ces références. Le procédé Sealosafe ne convient pas à la solidification des hydrocarbures et des déchets de solvants non miscibles à l'eau.

Lavage. - La capacité de rétention des hydrocarbures d'un sol dépend en partie de sa teneur en eau: plus un sol a une teneur élevée en eau, plus sa capacité de rétention des hydrocarbures est faible. La technique de lavage consiste à procéder à une lixiviation des hydrocarbures et à un remplacement par une commande hydraulique. On laisse pénétrer de grandes quantités d'eau dans le sol qui entraîne les hydrocarbures jusqu'à un entonnoir de récupération créé dans l'aquifère. On peut alors récupérer l'eau et les contaminants. Cette méthode ressemble à celle de la recharge, avec quelques variantes.

L'une des variantes consiste à laver la zone contaminée avec un détergent aqueux. Le détergent a une tension superficielle inférieure à celle de l'eau, et il déloge les

TABLEAU 11 TECHNOLOGIE DE FIXATION (28)

Technique	Description	Avantages	Inconvénients
À base de ciment	L'eau dans les déchets réagit en présence de ciment Portland anhydre. Le processus complet dure 28 jours, une résistance finale à la compression de 50 à 90 % est obtenue en 7 jours.	- Les additifs ont un coût raisonnable - Le mélange et la manipulation du ciment sont des techniques bien au point - Équipement de traitement facile à se procurer - Possibilité d'ajout de ciment pour adapter le procédé à une vaste gamme de teneurs en eau - Tolère les variations chimiques dans les déchets - La résistance et la perméabilité du produit final sont fonction de la quantité de ciment ajouté - Possibilité d'ajouter des agents d'étanchéité pour améliorer l'imperméabilité du produit final	- De grandes quantités de ciment sont nécessaires - le poids et le volume du produit final sont à peu près le double de ceux que l'on obtient avec les autres méthodes - Il y a dégagement d'ammoniac du fait de l'alcalinité du ciment - Les mélanges ciment-déchets de faible résistance sont parfois vulnérables à l'action des solutions de lixiviation acides - Il est parfois nécessaire de procéder à un prétraitement, d'utiliser des ciments plus coûteux ou des additifs coûteux si les déchets contiennent des impuretés affectant la prise et le durcissement du ciment
À base de chaux	On mélange des solutions aqueuses à de la chaux et des matériaux siliceux à grain fin (par ex., des cendres volcaniques ou des dépôts de lave, des cendres volantes) pour former un amalgame type béton. D'une façon générale, les matériaux les plus fins donnent les produits finals les plus résistants.	- Les additifs sont peu coûteux et faciles à obtenir - L'équipement nécessaire est facile à utiliser et à se procurer - La réaction chimique est bien connue - Il n'est pas nécessaire de procéder à une déshydratation poussée - De l'eau est nécessaire au processus de prise	- La chaux et les additifs augmentent le volume et la masse des déchets - Les boues stabilisées peuvent être attaquées par les solutions acides - Le temps de durcissement est plus long que pour le ciment - Il peut être nécessaire de tasser le produit final pendant la mise en place
Thermoplastique	Les déchets sont séchés, chauffés et mélangés à une matrice formée de bitume, de paraffine ou de polyéthylène. Le mélange se solidifie en refroidissant et est généralement placé dans des récipients, puis enterré. Les déchets sont physiquement (non chimiquement) incorporés au polymère.	- Les taux de lixiviation sont inférieurs à ceux des méthodes à base de ciment - Le séchage des déchets réduit le volume à traiter - Le produit final résiste à la plupart des solutions aqueuses - Les matériaux thermoplastiques adhèrent bien aux matériaux incorporés - Cette méthode permet la récupération des matériaux enrobés de thermoplastique, si nécessaire	- Les boues humides doivent être préséchées - L'équipement coûte cher et il faut du personnel qualifié - À ne pas utiliser avec des déchets qui se décomposent à température élevée - Danger d'incendie en raison de la présence de bitume et d'agents d'oxydation très actifs - Des hydrocarbures et des odeurs désagréables peuvent être libérés pendant le chauffage - Si des sels sont réhydratés dans la matrice, ils pourront se répandre et entraîner sa fracturation - En raison de sa nature plastique, la matrice peut nécessiter l'utilisation d'un récipient additionnel pour le transport et l'élimination
Polymères organiques	Les déchets humides ou secs sont soigneusement mélangés à un monomère et l'on y ajoute un initiateur. Le solide ainsi formé emprisonne les particules dans une masse spongieuse. Le liquide associé aux déchets doit être évaporé de la masse polymérique avant de l'éliminer.	- Une faible quantité d'additifs suffit généralement pour assurer le mélange - Les résines organiques ne sont pas aussi denses que le ciment - La prise des polymères à l'air ne nécessite pas des températures élevées	- Les polymères solidifiés résultants doivent être séchés - L'eau évaporée des polymères en stabilisation peut être fortement acide et contenir des quantités élevées de polluants - Certains initiateurs nécessitent l'utilisation d'un équipement de manipulation spécial (en raison de leur corrosivité) - Des vapeurs dangereuses ou désagréables peuvent être libérées au cours de la polymérisation - Certains polymères sont biodégradables
Encapsulation	Les déchets sont emprisonnés dans un revêtement formé d'un matériau inerte (enveloppe).	- Les contaminants très solubles sont complètement isolés de l'environnement - Il n'y a généralement pas besoin d'un récipient additionnel	- Les matériaux inertes (résines) sont coûteux - Le séchage, la fusion et la formation de l'enveloppe consomment beaucoup d'énergie - Les déchets doivent être séchés avant d'être encapsulés - Certaines résines sont inflammables - Les opérations de moulage et de fusion nécessitent l'intervention d'un personnel qualifié
Vitrification	Les déchets très dangereux peuvent être mélangés à de la silice et fondus à des températures élevées pour former du verre.	- Cette méthode devrait permettre un confinement très poussé des déchets - Les additifs sont relativement coûteux	- Cette méthode consomme beaucoup d'énergie - Certains composants peuvent s'évaporer avant d'être combinés avec la silice fondue pour former du verre - Il faut disposer d'un équipement spécialisé et d'un personnel bien formé
Autocimentation	Une petite quantité (8 à 10 % en masse) de déchets contenant de grandes quantités de sulfate ou de sulfite de calcium sont séchés et calcinés afin de produire du sulfate ou du sulfite de calcium partiellement déshydraté. Ce produit est ajouté au reste des déchets, ainsi que d'autres additifs, ce qui permet la formation d'une substance dure, ayant la consistance du plâtre.	- Aucun autre additif à préparer ou à expédier sur les lieux du traitement - La prise et le durcissement devraient être plus rapides que dans le cas des systèmes semblables à base de chaux - Le produit final est stable, ininflammable et non biodégradable - Cette méthode devrait permettre une rétention efficace des métaux lourds - Il n'est pas nécessaire de procéder au séchage complet des déchets - la réaction d'hydratation absorbe l'eau	- On ne peut utiliser que des déchets à forte teneur en sulfate et sulfite - Les caractéristiques de lixiviation sont semblables à celles des méthodes au ciment et à la chaux - La formation de produits à caractéristique de ciment calciné nécessite l'utilisation d'énergie - Cette méthode nécessite l'intervention d'un personnel qualifié et d'un équipement coûteux

TABLEAU 12 SYSTÈMES DE FIXATION (28)

Distributeur/fabricant	Processus
Aerojet Energy Conversion, Co. (Sacramento, CA)	Ciment Polymère organique Bitume
Anefco, Inc. (White Plains, NY)	Polymère organique (UF)*
Atcor, Inc. (Peekskill, NY)	Ciment
Brookhaven National Laboratory (Uptown, Long Island, NY)	Ciment et polymère organique
Chemfix (Kenner, LA)	Procédé Chemfix (ciment)
Chem-Nuclear Systems, Inc. (Bellevue, WA)	Ciment Polymère organique (UF)*
Delaware Custom Materials (Cleveland, OH)	Ciment avec schiste ou silicates
Dow Chemical Co. (Midland, MI)	Polymère organique (résines polyvinyliques)
Dravo Lime Co. (Pittsburgh, PA)	Calcium (à base de ciment)
Energy Inc. (Idaho Falls, ID)	Ciment Polymère organique (UF)*
Environmental Technology Corp. (Pittsburgh, PA)	Bentonite-ciment
General Electric Co. (San Jose, CA)	Ciment
Hittman Nuclear & Development Corp. (Columbia, MD)	Ciment Polymère organique (UF)*
I.U. Conversion Systems Inc. (Horsham, PA)	Poz-O-Tech (à base de chaux)
Newport News Industrial Corp. (Newport News, VA)	Bitume
Oak Ridge National Laboratory (Oak Ridge, TN)	Ciment avec additifs
Ontario Liquid Waste Disposal, Ltd. (Markham, Ontario)	Silicate
PEC Engineering (Paris, France)	Pétrifix
Protective Packaging, Inc. (Jeffersontown, KY)	Polymère organique (UF)*
Sludge Fixation Technology, Inc. (Orchard Park, NY)	Terra-Crete (Auto-cimentation)
Soil Recovery Inc. (Morristown, NJ)	Réactif à base de chaux vive/oxyde de calcium
Stabatrol Corp. (Norristown, PA)	Terra-Tite
Stablex Corp. (Radnor, PA)	Sealosafe
Stablex Corp. (Sainte-Thérèse, QC)	Sealosafe
Stock Equipment Co. (Cleveland, OH)	Ciment Polymère organique (UF)*
TJK Inc. (North Hollywood, CA)	Système de traitement des boues Takenaka
Todd Research and Technical Div. (Galeston, TX)	Ciment
TRW Systems Group (Redondo Beach, CA)	Études d'encapsulation pour l'EPA
United Nuclear Industries (Richland, WA)	Ciment avec silicate de sodium Polymère organique (UF)*
United Technologies (Sunnyvale, CA)	Polymère organique
Voest-Alpine Montagne (1015 Wein, Autriche)	À base de chaux
Washington State University (Pullman, Wa)	Encapsulation au polyester
Werner & Pfleinder Corp. (Ramsay, NJ)	Système de réduction de volume et de solidification
Westinghouse Electric Corp. (Pittsburgh, PA)	Ciment et vermiculite

* UF= Urée formaldéhyde.

hydrocarbures qui se sont infiltrés dans les pores et les capillarités du sous-sol. Cette méthode ne doit pas être utilisée sans l'accord des autorités qui gèrent les ressources en eau car les hydrocarbures émulsifiés et le détergent peuvent contribuer à contaminer davantage l'eau souterraine.

Une autre méthode consiste à utiliser de l'eau chaude pour recharger la formation. L'élévation de la température du produit diminue sa viscosité et entraîne une plus grande quantité d'hydrocarbures dans les puits de récupération. L'eau provenant des puits de récupération peut être réutilisée pour la recharge. Pour que ce procédé soit applicable, il faut lui trouver une méthode d'application rentable. Bien que le lavage soit un moyen fréquemment utilisé pour améliorer la récupération d'hydrocarbures, peu de recherches ou d'essais sur le terrain ont été effectués sur l'inondation d'une région contaminée avec de l'eau ou une solution de produits tensio-actifs en vue de juger s'il est possible de l'appliquer aux déversements dans des aquifères non confinés (26).

Exemple d'équipement qu'on peut se procurer dans le commerce pour le traitement des déchets dangereux:

Oil and Hazardous Material Spill Branch, U.S. Environmental Protection Agency

Équipement: Surfactant pour sol en dessous du sol de surface (Sub-surface Soil Surfactant) (28)

Remarques:

- Il s'agit d'un concept qui n'est étudié que sur le plan du traitement *in situ* des sols contaminés, à plus de 0,6 m de profondeur, par des matières organiques hydrophobes et légèrement solubles dans l'eau ou par des métaux lourds.
- De l'eau et un surfactant sont injectés dans le sol et le produit de lixiviation est récupéré dans un puits de rabattement de nappe ou une tranchée d'interception, à l'aide d'une pompe submersible ou de drains (figure 3) situés en contrebas de la zone de contamination. Le produit de lixiviation récupéré reçoit un traitement chimique et(ou) physique.
- Les essais en laboratoire ont été effectués par:
  JRB Associates
  8400 Westpark Drive
  McLean, VA 22102

  La récupération d'hydrocarbures a été environ dix fois supérieure à celle que donne le simple lavage à l'eau.

Extraction par solvants. - Cette technique de traitement ne s'applique qu'à des volumes relativement faibles de sol contaminé qui ont été extraits. On mélange un solvant au sol contaminé placé dans un conteneur. Les opérations dépendent du processus suivi. Le solvant contaminé est traité afin de le réutiliser, et le sol nettoyé est retransporté sur les lieux de l'excavation.

Exemples d'équipements qu'on peut se procurer dans le commerce pour le traitement des déchets dangereux:

Oil and Hazardous Materials Branch, U.S. Environmental Protection Agency

Équipement: Système d'extraction par solvants (Solvent Extraction System) (28)

Remarques:
- Il s'agit d'un prototype mobile pour extraire les produits chimiques du sol et des sédiments que l'on a enlevés du site de déversement.
- Ce système comprend un classeur à tamis vibrant, un épurateur à eau et lames, une unité de trempage, un extracteur chimique à contre-courant, des séparateurs hydrocyclones-recycleurs de déchets liquides et des épurateurs à air.
- Le sol est enlevé et les mottes de terre sont brisées. Le polluant est extrait de la suspension épaisse de terre avec de l'eau et des additifs. Le solvant subit un traitement supplémentaire pour récupérer le contaminant. Le sol nettoyé peut alors être rapporté au site de l'excavation.
- L'essai à l'échelle a été effectué par:
  Rexnord, Inc., Environmental Research Centre
  P.O. Box 2022
  Milwaukee, WI 53201

Sanexen International

Équipement: Extraksol

Remarques:
- Dispositifs montés sur patins, d'une capacité d'environ 2 tonnes par heure.
- Système de traitement en discontinu employant des récipients rotatifs, pour améliorer le contact entre le sol et la solution d'extraction. Lorsque la solution d'extraction est saturée de contaminants, elle est remplacée par une solution fraîche et le traitement est répété jusqu'à ce que l'on atteigne un degré d'extraction acceptable.
- La solution d'extraction peut être régénérée afin de la réutiliser.
- Il est conseillé d'utiliser un système en continu pour les quantités de sol dépassant 4000 tonnes. Le délai de livraison d'un tel système est d'environ quatre mois.
- On obtient les meilleurs résultats avec un sol de type sablonneux.

Solarchem

Équipement: Solvolox

Remarques:
- Procédé de traitement à trois étapes: lavage du sol, transfert du solvant et photo-oxydation.

- On utilise un solvant hydrophilique pour extraire le contaminant du sol. Le filtrat obtenu est alors concentré dans un évaporateur, puis transféré dans un dispositif d'extraction liquide-liquide contenant un solvant hydrophobe. On utilise des rayons ultra-violets et de l'ozone pour oxyder les contaminants dans l'extrait du solvant hydrophobe.
- Le coût de la décontamination varie selon le type de contaminant et sa concentration. Le traitement d'un sol ayant une teneur en BPC de 3000 ppm coûte de 153 $ à 238 $US/$m^3$.

Séparation par gravité. - La séparation par gravité est la technique de traitement des sols la plus simple. Le sol est excavé et placé dans de grands bacs. Les hydrocarbures se déplacent sous l'effet de la force de gravité, et ils sont recueillis dans des bassins de réception à la base du bac. Reste à résoudre le problème de l'extraction des polluants résiduels qui sont emprisonnés dans les pores du sol. (Cette méthode peut être facilement combinée au compostage afin de séparer le reste des hydrocarbures.) Le principal inconvénient de cette méthode est le fait que le sol doit être excavé, ce qui la rend coûteuse et nécessite une main-d'oeuvre importante.

Élimination par évents. - Les produits volatils comme l'essence restent souvent dans le sol sous forme de vapeurs et se déplacent jusque dans le sous-sol des immeubles voisins. Cela est particulièrement grave dans les sous-sols creusés où le sol est à nu. On peut y remédier quelque peu en procédant à toutes les obturations possibles, sauf dans le cas des sous-sols creusés, mais on peut installer une série d'évents artificiels passifs (figure 15) pour éliminer les vapeurs, technique particulièrement utile en hiver lorsque le gel empêche les vapeurs de s'échapper de façon naturelle au travers des sédiments de surface. Le système peut aussi être muni d'un ventilateur aspirant, si nécessaire (21, 48).

L'installation d'évents est considérée comme possible dans les sols à porosité et perméabilité moyennes à élevées (16). Les systèmes d'extraction de vapeurs au moyen de puits fonctionnent bien dans les sols qui ont une perméabilité de 10^{-4} à 10^{-8} cm/s avec un vide appliqué maximal d'environ 20 cm de mercure. Il peut être nécessaire d'utiliser un séparateur air-eau pour protéger la soufflante contre l'eau qui se trouve dans l'air extrait. Le court-circuitage de l'air provenant de la surface du sol peut être réduit en recouvrant la surface à traiter. Au lieu d'utiliser des puits d'extraction dans les cas où le sol contaminé ou l'eau souterraine se situent à moins de 4 à 5 m environ de la surface, on peut placer des tuyaux perforés au fond de tranchées.

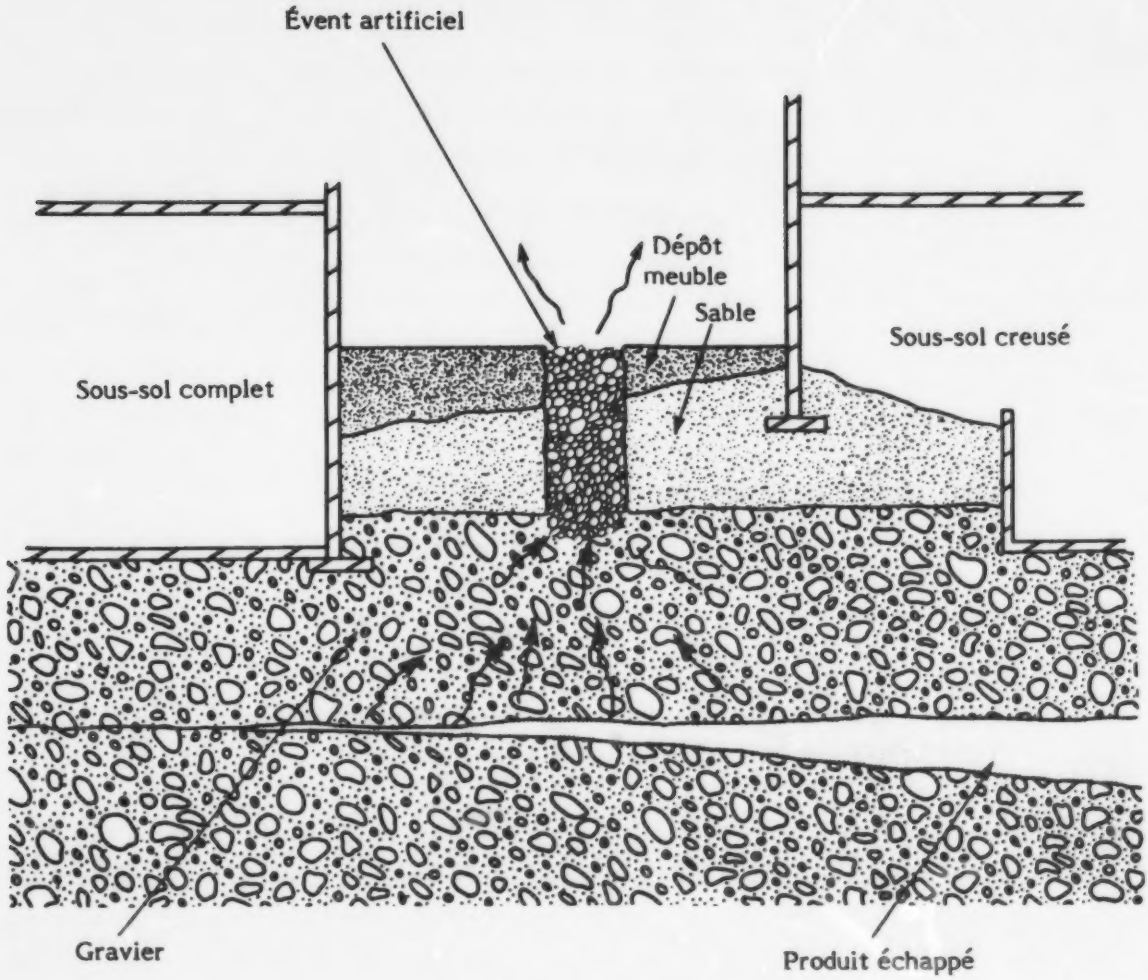


FIGURE 15 ÉLIMINATION DES VAPEURS PAR ÉVENTS (48)

La dispersion dans l'atmosphère des gaz ventilés peut ne pas être acceptable et il est alors nécessaire de les récupérer. On peut réduire ces émissions par adsorption sur charbon activé ou par combustion. Un évaporateur-condenseur peut servir de système de récupération du produit en amont de la colonne de charbon activé. Les systèmes au charbon activé présentent certains inconvénients, comme des risques d'incendie, et la possibilité d'encrassement après de nombreuses régénérations. Un système type d'adsorption de la phase vapeur est illustré à la figure 16 (49). Plusieurs types de systèmes portatifs sont actuellement en cours de mise au point aux États-Unis (49).

Au cours d'une étude effectuée par l'API, consistant à dégager des vapeurs d'essence du sol d'un site où un déversement s'était produit cinq ans avant, on a mesuré

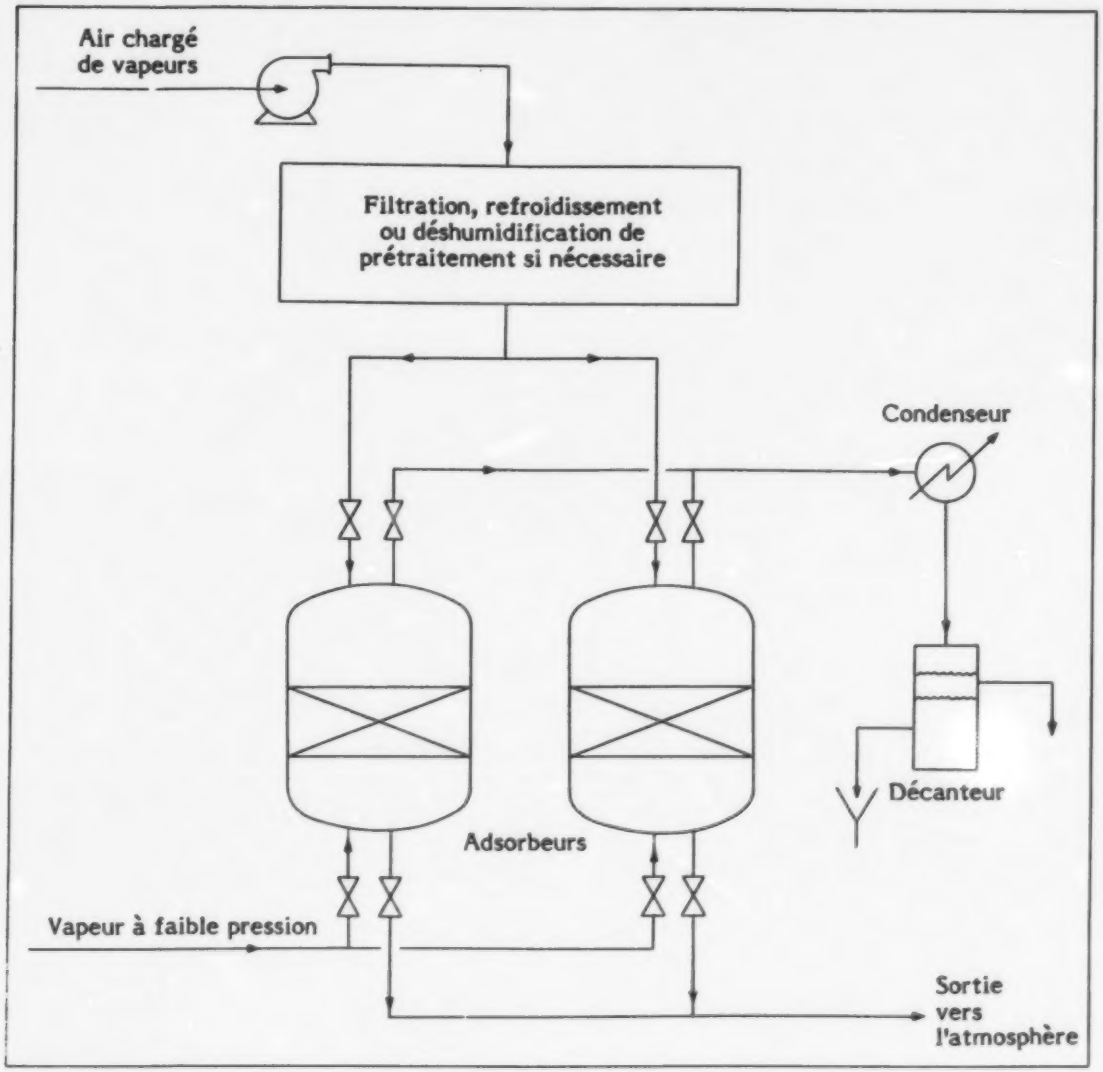


FIGURE 16 SYSTÈME D'ADSORPTION DE LA PHASE VAPEUR (49)

des rayons d'influence de 16 et 30 m à partir des puits de récupération des vapeurs, en appliquant des taux de pompage air-vapeurs de 0,65 m^3/mn et 1,1 m^3/mn. Les taux moyens de récupération des produits ont été de 11 litres/d et 23 litres/d. L'efficacité de ce système dépendait du vide appliqué, de la distance par rapport à la source de contamination et de la position de l'entrée d'air par rapport aux puits de récupération des vapeurs (49).

On a observé un rapport semblable entre le taux de récupération du produit et le taux de dépression pour un rayon d'influence de 12 m à partir d'un puits dans du sable, au cours du nettoyage d'un autre déversement d'essence (50).

Exemple d'équipement qu'on peut se procurer dans le commerce:

Groundwater Technology Inc., Division de Oil Recovery Systems Inc.

Équipement: Système de ventilation du sol (Soil Venting System)

Remarques:

- Ce système consiste à faire passer de l'air dans le sol, ce qui entraîne la vaporisation des hydrocarbures liquides qui y sont emprisonnés. Les vapeurs sont dirigées vers des tubes de ventilation sous la surface du sol qui les acheminent jusqu'au système d'adsorption sur charbon activé ou jusque dans l'atmosphère où elles se dispersent.
- À utiliser une fois que la majeure partie du déversement a été nettoyée, pour éliminer les problèmes dus aux vapeurs résiduelles. Sert à extraire les hydrocarbures qui ont saturé le sol et ne peuvent être déplacés par l'eau.
- Ce système permet d'extraire entre 12 et 18 litres/h d'essence liquide si il traite de l'air dont la teneur en vapeur d'essence est de 0,1 p. 100.
- Il peut servir de système de récupération secondaire avec le système Scavenger, d'évent intercepteur ou d'évent pour l'aération de sous-sols.

Extraction par la vapeur. - Aux États-Unis, l'EPA étudie actuellement *in situ*, l'extraction de contaminants dans le sol par l'injection *in situ* de vapeur dans un milieu gardé sous pression négative. Ce projet comporte une étude de faisabilité à échelle réduite pour une gamme de produits chimiques et de sols, ainsi que la mise au point d'une petite unité pilote d'extraction par la vapeur avec création d'un vide visant à améliorer la récupération. Viendra ensuite la mise au point d'un système utilisable sur le terrain. A.E. Lord, R.M. Koerner et V. Murphy, de l'Université Drexel, à Philadelphie (Pennsylvanie), procèdent actuellement à des essais en laboratoire.

RÉFÉRENCES

1. Woods, R.H. Jr. et D.E. Webster, "Underground Storage Tanks: Problems, Technology and Trends", *Pollution Engineering, 16* (7), juillet 1984.

2. Butts, E.O., "The Detection of Leaks in Liquid Phase Hydrocarbon Storage and Transmission Facilities", *Engineering Journal, 60* (3), juin 1977.

3. Cheremisinoff, P.N., J.G. Casana et R.P. Ouellette, "Special Report: Underground Storage Tank Control", *Pollution Engineering, 18* (2), février 1986.

4. McLean, F.R., "Testing Underground Flammable", *Fire Journal, 66* (6): 24, novembre 1972.

5. Butts, E.O., "The Integrity of Underground Gasoline Storage Tanks", *Canadian Association of Fire Chiefs Inc. Dialogue* (17), juillet 1978.

6. Province du Manitoba, *Report on the Investigation of the Pollution of Underground Water by Refined Petroleum Products*, The Clean Environment Commission, Winnipeg (Manitoba), décembre 1975.

7. American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Bulk Liquid Stock Control at Retail Outlets*, publication de l'API nº 1621, Washington, D.C., 1977.

8. U.S. NFPA, *329 Recommended Practices for Underground Leakage of Flammable and Combustible Liquids*, United States National Fire Protection Association, 1983.

9. Curran, S.D., "Prevention and Detection of Leaks from Underground Gasoline Storage Systems", dans: *Proceedings, 6th National Ground-Water Quality Symposium*, National Water Well Association, Worthington (Ohio), 1982.

10. Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, *Underground Tank Testing Symposium*, Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, Ottawa (Ontario), 1982.

11. Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, *Underground Tank Systems; Review of State-of-the-art and Guidelines*, Rapport PACE nº 82-3, Ottawa (Ontario), 1983.

12. Dennis, D.M., "Effectively Recovering Oil Spills to Groundwater", dans: *Proceedings, Oil Spill Conference*, publication de l'American Petroleum Institute nº 4284, Washington, D.C., 1977.

13. Donaghey, L.F., "Groundwater Protection Through Early Detection of Hydrocarbon Leaks", dans: *Proceedings, Oil Spill Conference*, publication de l'American Petroleum Institute nº 4385, Washington, D.C., 1985.

14. Environnement Canada, *Evaluation and Prevention of Corrosion Leaks on Buried Storage Tanks*, rapport provisoire par Corrosion Services Co. Ltd., Toronto (Ontario), pour Environnement Canada, publication EC nº EE-14, Ottawa (Ontario), 1981.

15. American Petroleum Institute, *Underground Unprotected Steel Trank Study: Statistical Analysis of Corrosion Failures*, rapport provisoire par Warren Rogers, pour API, Washington, D.C., 1981.

16. American Petroleum Institute, *Subsurface Venting of Hydrocarbon Vapors from an Underground Aquifer*, publication de l'API nº 4410, Washington, D.C., 1985.

17. Haxo, H.E., J.A. Miedema et N.A. Nelson, "Permeability of Polymeric Membrane Lining Materials", dans: *Proceedings, International Conference on Geomembranes*, Industrial Fabrics Associates International, St-Paul (Minnesota), 1984, vol. II, p. 151.

18. Wallace, R.B. et K.D. Eigenbrod, "An Unprotected HDPE in a Subarctic Environment", dans: *Proceedings, International Conference on Geomembranes*, Industrial Fabrics Associates International, St-Paul (Minnesota), 1984, vol. I, p. 73.

19. Wollak, H.F., "PVC/ethylene Interpolymer Alloys for Plasticizers - Free Membranes", dans: *Proceedings, International Conference on Geomembranes*, Industrial Fabrics Associates International, St-Paul (Minnesota), 1984, vol. I, p. 73.

20. Environnement Canada, *State-of-the-art in Design, Use, Monitoring and Testing of Vertical Barriers at Waste Disposal Sites and Contaminated Land Sites; Future Research Needs*, rapport provisoire par GTC Geologic Testing pour la Division de la gestion des déchets, Conservation et Protection, Ottawa (Ontario), 1985.

21. Farmer, V.E., "Behaviour of Petroleum Contamination in an Underground Environment", dans: *Proceedings, Seminar on Groundwater and Petroleum Hydrocarbons: Protection, Detection, Restoration*, Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, Ottawa (Ontario), 1983, chap. 2.

22. Blake, S. et R. Lewis, "Underground Oil Recovery", *Groundwater Monitoring Review, 3* (2), printemps 1983.

23. CONCAWE, *Revised Inland Oil Spill Cleanup Manual*, rapport CONCAWE nº 7/81, La Haye, Pays-Bas, 1981, chap. 2, 4, 6, 7.

24. Shepherd, W.D., "Prioritization of Geohydrological Efforts and Site Assessments", dans: *Proceedings, Seminar on Groundwater and Petroleum Hydrocarbons: Protection, Detection, Restoration*, Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, Ottawa (Ontario), 1983, chap. 11.

25. Saunders, W.R., R.W. Castle et C.R. Foget, "Delineation of Subsurface Petroleum Spills Using Terrain Conductivity Measurements", dans: *Proceedings, Oil Spill Conference*, publication de l'American Petroleum Institute nº 4356, Washington, D.C., 1983.

26. Blake, S. et J. Fryberger, "Containment and Recovery of Refined Hydrocarbons from Groundwater", dans: *Proceedings, Seminar on Groundwater and Petroleum Hydrocarbons: Protection, Detection, Restoration*, Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, Ottawa (Ontario), 1983.

27. American Petroleum Institute, *The Migration of Petroleum Products in Soil and Ground Water; Principles and Countermeasures*, publication de l'API nº 4149, Washington, D.C., 1972.

28. S.L. Ross Environmental Research Ltd., *Répertoire de systèmes, de produits et de matériel de lutte contre les déversements*, Environnement Canada, SPE 9/SP/2, Ottawa (Ontario), 1987.

29. Donison, H., H. Whittaker, J. Tremblay et R. Dutton, "Development and Demonstration of a Mobile Reverse Osmosis/Adsorption Treatment System for Environmental Clean-ups", dans: *Proceedings, Technical Seminar on Chemical Spills*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1987.

30. Simovic, L., L.A. Lishman et S.A. Zaidi, *The Use of Air Stripping and Vapour Phase Adsorption Processes for the Removal of Volatile Organics from Contaminated Groundwater - Gloucester Study*, Environnement Canada, Centre technique des eaux usées, Burlington (Ontario), 1976.

31. Simovic, L., J.P. Jones et I.C. McClymont, "Physical/Chemical Removal of Organic Micropollutants from RO Concentrated Contaminated Groundwater", dans: *Proceedings, 3rd National Conference and Exhibition on Hazardous Wastes and Hazardous Materials*, Hazardous Material Control Research Institute, Silver Springs (Maryland), 1986.

32. Breton, M., P. Frillia, M. Kravett, S. Palmer, A. Shayer et N. Surpunant, *Technical Resource Document; Treatment Technologies for Solvent Containing Wastes*, rapport de l'Environmental Protection Agency, EPA/600/52-86/095, Washington, D.C., 1987.

33. Environnement Canada, *Steam Stripping as an Environment Emergencies Countermeasure*, rapport provisoire par CH2M Hill, Mississauga (Ontario), pour la Division des techniques d'intervention d'urgence, Conservation et Protection, Ottawa (Ontario), 1987.

34. Whittaker, H. et O.V. Nowakiwsky, "Reverse Osmosis at the Gloucester Landfill", dans: *Proceedings, Technical Seminar on Chemical Spills*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1983.

35. Whittaker, H., *Applications Testing with the Environment Canada Mobile Reverse Osmosis Unit*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1986.

36. Whittaker, H., "Cleanup of PCB Contaminated Groundwater by Reverse Osmosis", dans: *Proceedings, Technical Seminar on Chemical Spills*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1985.

37. Stratorelli, J.B. et H. Whittaker, "Reverse Osmosis for Cleanup of Spilled Wood Protection Solution", dans: *Proceedings, Technical Seminar on Chemical Spills*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1985.

38. Dutton, R. et H. Whittaker, "Cleanup from the Pesticide Warehouse Fire - Canning, Nova Scotia", dans: *Proceedings, Technical Seminar on Chemical Spills*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1987.

39. Whittaker, H., "La technologie des membranes dans l'industrie pétrolière", *Bulletin de la lutte contre les déversements, 11* (1): 17, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), mars 1986.

40. Brown, K.W., D.C. Anderson, C. Smith et S.G. Jones, *Hazardous Waste Land Treatment*, Ann Arbour Science-Butterworth Publishers, Ann Arbour (Michigan), 1983, chap. 6, p. 345.

41. Yaniga, P., "Groundwater Abatement Techniques for Removal of Refined Hydrocarbons", dans: *Proceedings, Seminar on Groundwater and Petroleum Hydrocarbons: Protection, Detection, Restoration*, Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, Ottawa (Ontario), 1983, chap. 7.

42. Lee, M.D., "Reclamation of Contaminated Aquifers: Biological Techniques", dans: *Proceedings, Hazardous Material Spills Conference by Assoc. of Am. Railroads*, Chem. Manuf. Assoc., U.S. Coast Guard, U.S. EPA, publié par Government Institutes Inc., Rockville (Maryland), 1984.

43. Minugh, E.M., J.J. Patry, D.A. Keech et W.R. Leek, "A Case History: Cleanup of a Subsurface Leak of Refined Product", dans: *Proceedings, Oil Spill Conference*, publication de l'American Petroleum Institute n° 4356, Washington, D.C., 1983.

44. Raymond, R.L., V.W. Jamison et J.O. Hudson, "Beneficial Stimulation of Bacterial Activity in Groundwater Containing Petroleum Products", *AIChE Symposium Series*, 73 (166), 1977.

45. Gill, S.D. et G. Stevens, "Utilisation de l'incinérateur Trecan - APCEC après la catastrophe du Kurdistan", *Bulletin de la lutte contre les déversements*, EPS-3-EC-81-8, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1981, p. 8.

46. Meikle, K.M. et H.B. Ewing, "Oil Spill Incinerator Development: An Update", dans: *Proceedings, Third Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1980.

47. Knowlton, H., "A Discussion of Groundwater Contamination and Petroleum Refineries", dans: *Proceedings, Seminar on Groundwater and Petroleum Hydrocarbons: Protection, Detection, Restoration*, Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, Ottawa (Ontario), 1983, chap. 12.

48. O'Connor, M.J. et L.W. Bouckhout, "Gazoline Spills in Urban Areas: A comparison of Two Case Histories", dans: *Proceedings, Seminar on Groundwater and Petroleum Hydrocarbons: Protection, Detection, Restoration*, Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien, Ottawa (Ontario), 1983, chap. 8.

49. Cheremisinoff, P.N., "Solvent Vapor Recovery and VOC Emission Control", *Pollution Engineering*, *18* (6), juin 1986.

50. Batchelder, G.V., W.A. Panzeri et H.T. Phillips, "Soil Ventilation for the Removal of Adsorbed Liquid Hydrocarbons in the Subsurface", dans: *Proceedings, Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection and Restoration*, National Water Well Association, Dublin (Ohio), 1986.

BIBLIOGRAPHIE

1. American Petroleum Institute, ***Secondary Containment for Underground Petroleum Products Storage Systems at Retail Outlets***, rapport provisoire par Radian Corporation, Austin (Texas), API Ground Water Task Force, Washington, D.C., 1984.

2. Bennedsen, M.B., "Vacuum Volatile Organic Compounds from Soil", ***Pollution Engineering, 19*** (2), février 1987.

3. Petroleum Equipment Institute, "Tightness-testing Systems for Underground Tanks", ***33rd Annual Convention of the PEI***, PEI Manual 83-1, Tulsa (OK), 1983.

ANNEXE

LISTE PARTIELLE DES DISTRIBUTEURS/FOURNISSEURS, ENTREPRISES ET ORGANISMES CONSULTÉS

ANNEXE LISTE PARTIELLE DES DISTRIBUTEURS/FOURNISSEURS, ENTREPRISES ET ORGANISMES CONSULTÉS

Entreprise	Produit
AFL/INDUSTRIES INC. 1149 Howard Drive West Chicago, IL 60185 (312) 231-7555 (800) 323-1732	Soupape d'arrêt d'hydrocarbures Clark AFL
ANCO CHEMICALS LTD. - C.P. 400 Maple (Ontario) L0J 1E0 (416) 832-2276 - 6905, rue Hébert Ville Ste-Catherine (Québec) J0L 1E0 (514) 632-0950	Imbibeurs
BAT ENVITECH INC. P.O. Box 7826 3777 Long Beach Blvd. Long Beach, CA 90807 (213) 427-6824	Système de contrôle de l'eau souterraine BAT
B.C. RESEARCH 3650 Wesbrook Mall Vancouver (C.-B.) V6S 2L2 (604) 224-4331	Détecteur de fuites de réservoirs
CAE (Canadian Aviation Electronics) C.P. 548 Belleville (Ontario) K8N 5B2 (613) 966-8086	Fabricant de réservoirs FRP
CALGON CANADA 27 Finley Road Bramalea (Ontario) L6T 1B2 (416) 457-5310	- Système interphase - Adsorption sur charbon activé par écoulement par gravité
CANMAR C.P. 200 Calgary (Alberta) T2P 2H8 (403) 231-8008	Incinérateur à four rotatif
CONTEL ENGINEERING LTD. 40 Torlake Crescent Toronto (Ontario) M8Z 1B3 (416) 252-4148	Consultant - Doublures de membranes

Entreprise	Produit
CORROSION SERVICES COMPANY LTD. Toronto (Ontario) (416) 630-2600	
CLAWSON TANK COMPANY 4701 White Lake Road Clarkson, MI 48016 (313) 625-8700	Réservoirs à double paroi
CLEAN ENVIRONMENT ENGINEERS 38 Caselli Avenue San Francisco, CA 94114 (415) 521-2161 (415) 621-2722	Système d'écrémage SOS
CROWLEY ENVIRONMENTAL SERVICES CORP. 3400 E. Marginal Way S. Seattle, WA 98134 (206) 682-4674 (206) 682-4898	Distributeur d'équipement d'intervention
D.J. PETROLEUM MAINTENANCE Box 902 Falher AB Mov. XJB 2449 (403) 837-2468	Installation et essai de réservoirs, intervention en cas de fuites de réservoirs
DETOX INC. 8721 Woodglen Point Dayton, OH 45459 (513) 433-7394	Systèmes portatifs de traitement industriel Detox
EMCO INC. 1015 Louisiana Street Little Rock, AR 72207 (501) 374-7878	
EMTEK INC. Northwood Executive Park 10 Northern Blvd. Amherst, NH 03031 (603) 883-7111	Contrôle de la pollution de l'eau souterraine
ENVIRONNEMENT CANADA Direction du développement technologique et des services techniques Centre environnemental de River Road Ottawa (Ontaric) K1A 0H3 (613) 998-9622	Unité mobile UF/OI

Entreprise	Produit
ETHYL CORPORATION Houston, TX (609) 452-8600	Ethyl Tank Sentry (Détecteur de fuites de réservoirs)
FLEXALON P.O. Box 8697 The Woodlands Houston, TX (713) 292-3233	Installateur de membranes
FMC CORPORATION SPECIALTY CHEMICALS DIVISION 2000 Market Street Philadelphia, PA 19103 (215) 299-6763	Programme de biorégénération amélioré - Systèmes de réassainissement des aquifères
GENELCO INC. 11649 Chairman Drive Dallas, TX 75243 (214) 341-8410	Détecteur de fuites de gaz Soil Sentry
COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA 601, rue Booth Ottawa (Ontario) K1A 0E8 (615) 995-5745	
GEONICS LIMITED 1745 Meyerside Drive Unit B Mississauga (Ontario) L5T 1C5 (416) 676-9580	Mesures de conductivité des terrains

Propriétaires canadiens du détecteur de fuites Heath Petro-Tite

HEATH CONSULTANTS LTD. 954 Leathorne Street London (Ontario) N5Z 3M5 (519) 686-6446 M. D. Brochu	Heath Petro-Tite (Détecteur de fuites)
IRVING OIL LTD. C.P. 1421 Saint-Jean (N.-B.) E2L 4K1 (506) 632-2000	Détecteur de fuites

Entreprise	Produit
CREEDES PETROLEUM EQUIPMENT & MAINTENANCE LTD. 23 Norwood Road Charlottetown (Î.-P.-É.) C1A 6P7 (902) 892-6036 M. K. Smith	Détecteur de fuites
GENCO 19 Akerley Dartmouth (N.-É.) B3B 1J6 (902) 469-5325	Détecteur de fuites
Research & Productivity Council C.P. 6000 College Hill Road Fredericton (N.-B.) E3B 5H1 (506) 452-8994	Détecteur de fuites
WATER MANAGEMENT SERVICES LTD. C.P. 1116 776 McLeod Avenue Fredericton (N.-B.) E3B 5C2 (506) 458-8288	Détecteur de fuites
ESSO CANADA LTD. 1981, rue McGill College Montréal (Québec) H3A 3B2 (514) 287-7452 M. D. Robinson	Détecteur de fuites
GROUNDWATER TECHNOLOGY INC. Filiale de OIL RECOVERY SYSTEMS INC. 8435, rue Notre-Dame est, Bureau 2 Montréal (Québec) H1L 3L3 (514) 353-6939	Détecteur de fuites
SHELL CANADA LTD. 758, rue Sherbrooke ouest Montréal (Québec) H3A 1G1 (414) 287-7213 M. R. Desmarais	Détecteur de fuites
SANEXEN INTERNATIONAL INCORPORATED 3027 Harvester Road Burlington (Ontario) L7N 3G7 (416) 681-3366	Détecteur de fuites

Entreprise	Produit
ESSO CANADA LTD. 10060 Jasper Avenue Edmonton (Alberta) T5J 3R8 (403) 420-8490 M. M. Chapman	Détecteur de fuites
B.C. PETROLEUM ASSOCIATION Suite 1004, Kapilano 100 100 Park Royal West Vancouver (C.-B.) V7T 1A2 (604) 926-7431 M. Green	Détecteur de fuites

Propriétaires canadiens du détecteur de fuites Ezy-Check Horner

HORNER CREATIVE METALS INC. 211 East Grove Kawkawlin, MI 48631 (517) 684-7180 M. P. Schuster	Détecteur de fuites de réservoirs Ezy-Check Horner
E-JAY PETROLEUM SERVICES 242, 62nd Avenue S.E. Calgary (Alberta) T2H 2E6 (403) 252-4409	Détecteur de fuites 1984
WESTERN OIL SERVICES LTD. 8264 Ontario Street Vancouver (C.-B.) V5X 3E4 (604) 321-1266 M. R.F. Bartlett	Détecteur de fuites
RUDIES PETROLEUM 3015 Sixsmith Road, No. 5 Kelowna (C.-B.) V1V 1L2 (604) 765-1418 M. N. McWilliam	Détecteur de fuites

Propriétaires canadiens du détecteur de fuites Hunter

HUNTER ENVIRONMENTAL SERVICE 18 Great Valley Parkway Suite 406 Nalborn, PA 19355 (315) 296-7380	Détecteur de fuites de réservoirs

Entreprise	Produit
GROUNDWATER TECHNOLOGY INC. Filiale de OIL RECOVERY SYSTEMS INC. 8435, rue Notre-Dame est, Bureau 2 Montréal (Québec) H1L 3L3 (514) 353-6939	Détecteur de fuites
K-V ASSOCIATES, INC. 281 Main Street, P.O. Box 574 Falmouth, MA 02540 (617) 540-0561	Débitmètre d'eau souterraine
MARTEK INSTRUMENTS INC. 17302 Daimler Street P.O. Box 16487 Irvine, CA 92713 (714) 540-4435	Surveillance des eaux souterraines
MARCLIN INDUSTRIES Nisku (Alberta) (403) 955-2514	Fabricant de réservoirs
MEMCARE INC. 1435 Prince of Wales Drive Suite 1008 Ottawa (Ontario) K2C 1N5 (613) 723-1981	Systèmes d'osmose inverse
MOONEY EQUIPMENT CO. INC. 7780 Townsend Place New Orleans, LA 70126 (504) 241-0453	Détecteur de fuites de réservoirs
NEPCCO, EQUIPMENT DIVISION 29 Wall Street Foxboro, MA 02035 (617) 543-8458	- Pétropurge/Hydropurge - Systèmes de traitement AS et CA - Gamme complète de détecteurs, dispositifs de surveillance
OIL AND HAZARDOUS MATERIAL SPILL BRANCH U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY Municipal Environmental Research Laboratory Woodbridge Avenue Edison, NJ 08837 (201) 321-6634	- Système d'adsorption sur charbon activé - Système d'extraction par solvant - Système surfactant du sol au-dessous de la surface

Entreprise	Produit
OIL RECOVERY SYSTEMS INC. GROUNDWATER TECHNOLOGY INC. - 1420 Providence Hwy, Suite 128 Norwood, MA 02062 (617) 769-7600 - 8435, rue Notre-Dame est, Bureau 2 Montréal (Québec) H1L 3L3 (514) 353-6939	- Système Scavenger - Systèmes de ventilation du sol et de traitement par biodégradation, AS et CA - Gamme complète de détecteurs, dispositifs de surveillance
OPW-DOVER CORPORATION Scarborough (Ontario)	Détecteur optique de niveau du liquide
PACE (Association pétrolière pour la conservation de l'environnement canadien) 1202 - 275, rue Slater Ottawa (Ontario) K1P 5H9 (613) 236-9122	
POLYBAC CORP. 8455 Wilddeer Trail P.O. Box 30 Roscoe, IL 61073	Agent de mutation Polybac - Hydrocarbone bactérien - Agent de dégradation
P.R. MALLORY & CO., INC. 4760 Kentucky Avenue Indianapolis, IN 46241 (317) 856-3857	Détecteur Pollulert
REXNORD INC. Environmental Research Centre P.O. Box 2022 Milwaukee, WI 53201	Système d'extraction par solvant
RMT INC. 1406 E. Washington Avenue Suite 124 Madison, WI 53702 (608) 255-2134	Détecteur de fuites souterraines
RNG EQUIPMENT 32 Stouffville Drive Toronto (Ontario) M9W 1A8 (416) 249-7383	Distributeur des produits NEPCCO

Entreprise	Produit
ROMICON INC. Filiale de ROHM & HASS CO. 100 Cummings Park Woburn, MA 01801 (617) 935-7840	Système UF à fibres creuses
SANIVAN INC. Filiale de SANEXEN INTERNATIONAL INC. 1705, 3e Avenue Pointe-aux-Trembles Montréal (Québec) H1B 5M9 (514) 353-9170	Distributeur des produits NEPCCO
SANEXEN INTERNATIONAL INC. 7777, boul. Louis-H. Lafontaine Anjou (Québec) H1K 4E4 (514) 355-3351	Système de traitement des sols
SEAGOLD INDUSTRIES CORP. 4008 Myrtle Street Burnaby (C.-B.) V5C 4G2 (604) 437-4445	Systèmes d'osmose inverse
SEPROTECH SYSTEMS INC. 2378 Hollylane Ottawa (Ontario) K1V 7P1 (613) 523-1641	Systèmes d'osmose inverse
SHELL CANADA LTD. Toronto (Ontario) (416) 443-7032 M. J. Witherspoon	Détecteur de fuites PACE
SMITH & DENISON 1581 Industrial Parkway West Suite 3 Hayward, CA 94544 (415) 782-9788	Détecteur de fuites de réservoirs
SOIL RECOVERY INC. P.O. Box 2147 95 Madison Avenue Morristown, N.J. USA 07960 (201) 540-0566	Encapsulation des sols

Entreprise	Produit
SOLARCHEM 516 Gordon Baker Road Willowdale (Ontario) M2H 3B4 (416) 495-9905	Traitement des sols
SPEARHEAD TECHNOLOGY INC. 525 Seymour Street, Suite 704 Vancouver (C.-B.) V6B 3H7	Appareils de contrôle STI 2X12 et 2X4 (Dispositifs de surveillance des réservoirs souterrains)
SRI INTERNATIONAL Menlo Park, CA (415) 424-1251	Détecteur de fuites de réservoirs
TELEDYNE GEOTECH P.O. Box 469007 Garland, TX 75046 (214) 271-2561	Dispositifs de contrôle des fuites
TOTAL CONTAINMENT 215 Colonnade Road Nepean (Ontario) (613) 226-4873	- Conteneur global - Détecteur de fuites à câbles dégradables
TRECAN LIMITED 4530 Dixie Road Mississauga (Ontario) L4W 1N2 (416) 625-4030	Four rotatif
VACUTECT 16900, 107th Avenue P.O. Box 2404 Toronto (Ontario) T5J 2S1 (403) 483-3506 M. M.E. Adams	Détecteur de fuites de réservoirs
VEEDER-ROOT CO. 70 Sargent Street Hartford, CT 06102	Détecteur de fuites souterraines TLS 250
WARREN ROGERS ASSOCIATES INC. 65 Bellevue Avenue Newport, RI 02840	Modèle de corrosion
ZENON ENVIRONMENTAL INC. 845 Harrington Court Burlington (Ontario) L7N 3P3 (416) 639-6320	Systèmes d'osmose inverse